Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Optimierung potentialgesteuerter SF_6-Kabel

angefertigt von

cand.-ing. Bernd W i e b u s

bei Prof. Dr.-Ing. Heinrich Brakelmann

Fachgebiet
Elektrische Energieübertragung

an der

Gerhard Mercator Universität Gesamthochschule
Duisburg

Duisburg im April 1995

AUFGABE der DIPLOMARBEIT

im Hauptstudium D I

für: Herrn cand.-ing. Bernd Wiebus

gestellt von: Prof. Dr.-Ing. H. Brakelmann

Thema: "Optimierung potentialgesteuerter SF_6-Kabel"

Aufgabenstellung:

Es ist rechnerisch zu untersuchen, inwieweit durch Einführung einer Steuerschicht bei SF_6-isolierten Höchstspannungskabeln eine Abmessungs- und Materialverminderung erreichbar ist. Die Untersuchungen sind zunächst für einphasige Anordnungen und anschließend, falls möglich, auf dreiphasige Anordnungen zu erweitern.

Der Vorsitzende
des Prüfungsausschusses Elektrotechnik

Der Betreuer
Prof. Dr.-Ing. H. Brakelmann

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, daß ich die Arbeit bis auf die offizielle Betreuung durch den Aufgabensteller selbständig und ohne fremde Hilfe verfaßt habe.

Die verwendeten Quellen sowie verwendete Hilfsmittel sind vollständig angegeben. Wörtlich übernommene Textteile und übernommene Bilder und Zeichnungen sind in jedem Einzelfall kenntlich gemacht.

Duisburg, den ....

....
Unterschrift des Kandidaten

Inhalt

1. Einleitung

Beim Transport von Elektrizität werden hohe Spannungen eingesetzt, um große elektrische Leistungen übertragen zu können. Hierzu werden unter anderem flexible Kabel und starre Rohrleiter verwendet, die jedoch nicht verlustfrei arbeiten.

Die dielektrischen Verluste eines mit Wechselspannung beanspruchten Kabels sind proportional zum Quadrat der Leiterspannung U_0. Sie sind ebenfalls proportional zur Kabelkapazität C und dem dielektrischen Verlustfaktor $\tan\delta$ des verwendeten Isoliermaterials. Daher sind zum Beispiel bei Kabeln mit Öl-Papierisolierung ab 110 kV und bei polyethylenisolierten Kabeln ab 380 kV die dielektrischen Verluste nicht mehr vernachlässigbar [1].

Um die dielektrischen Verluste im Isoliermaterial zu verringern, besteht der Wunsch, ein Material mit kleinem dielektrischen Verlustfaktor und kleiner relativer Dielektrizitätskonstante zu verwenden. Gleichzeitig verringert die Verwendung eines solchen Materials auch den Kapazitätsbelag der Leitung. Siehe hierzu [1] und [2].

Gase erfüllen diese Forderungen im allgemeinen. Auch bieten sie, durch Konvektion und Strahlung thermischer Energie vom Leiter zum Mantel, eine gute Kühlung für den Innenleiter [1]. Da auch noch andere Eigenschaften wie hohe Durchschlagfestigkeit, gute Löscheigenschaften bei Lichtbögen und geringe Leitfähigkeit eine Rolle spielen, wird dazu im allgemeinen das Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) benutzt.

Die Durchschlagfestigkeit von SF_6 ist allerdings deutlich geringer als die von festen Isolierstoffen. Während z. B. bei Öl-Papierisolierungen Betriebsfeldstärken von 8-18 kV/mm erreicht werden können, sind bei SF_6 nur 3-5 kV/mm möglich [1].

Dies führt zu sehr dicken Kabeln und Rohrleitern, die in der Fertigung materialintensiv sind. Ferner sind sie schlechter trommelbar und benötigen mehr Platz. Daher interessiert es, Möglichkeiten zu finden, die einen kompakteren Aufbau der gasisolierten Kabel- und Rohrleitersysteme gestatten.

Neben der Möglichkeit, die drei Teilleiter eines Drehstromsystems zusammen in ein Hüllrohr zu montieren, besteht die Möglichkeit, den Platz- und Materialbedarf durch bessere Ausnutzung des Dielektrikums zu verringern. Dies kann durch eine Schichtung des Dielektrikums [3], oder durch Einfügen einer Steuerelektrode erfolgen. Letztere Möglichkeit soll in dieser Arbeit untersucht werden.

2. Grundlagen

Bei der koaxialen Anordnung von Leitern ergibt sich die Schwierigkeit, daß aufgrund der Geometrie der Anordnung eine Konzentration der elektrischen Feldstärke am Innenleiter auftritt. Die Gleichung:

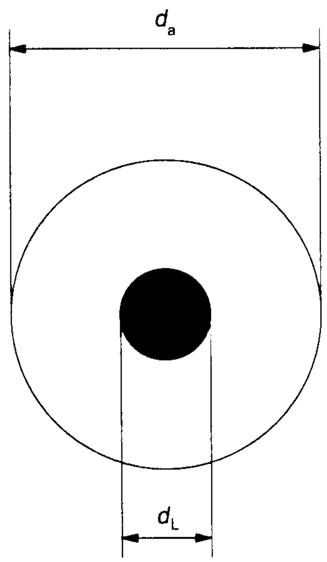
$$E(d) = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{d_a}{d_L}\right)} \cdot \frac{2}{d} \tag{1}$$

beschreibt eine solche Anordnung [3], wobei $E(d)$ die elektrische Feldstärke in Abhängigkeit vom Durchmesser d ist. U_0 ist die Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden, d_L der Außendurchmesser des Innenleiters und d_a der Innendurchmesser des Außenleiters. Es zeigt sich, daß an der Innenelektrode das Maximum und an der Außenelektrode das Minimum des Feldstärkeverlaufs auftritt. Bei gegebener Potentialdifferenz und gegebener maximal zulässiger Feldstärke E_{max} des Isolierstoffes hängt der Außendurchmesser direkt vom Durchmesser des Innenleiters ab, und umgekehrt. Die hierzu umgestaltete Formel lautet:

$$d_a = d_L \cdot \exp\frac{2 \cdot U_0}{E_{max} \cdot d_L} \tag{2}$$

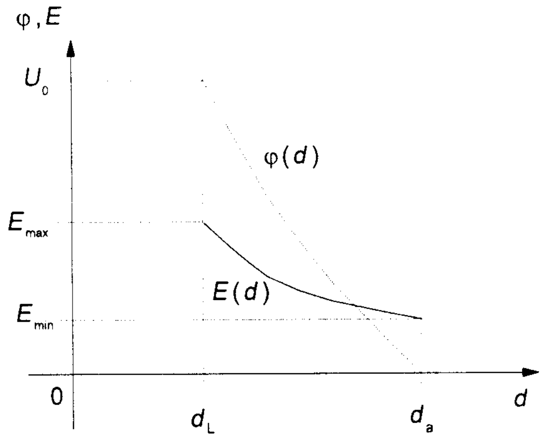
Hierin sind d_a der Innendurchmesser des Außenleiters und d_L der Außendurchmesser des Innenleiters (siehe Abb.1a). Es ist ersichtlich, daß für $d_L \rightarrow 0$ der Durchmesser des Außenleiters wegen des Quotienten im Exponenten gegen unendlich strebt, und für $d_L \rightarrow \infty$ ebenfalls wegen des Linearfaktors d_L. Das Minimum ergibt sich für ein Verhältnis $d_a/d_L = e$. Das Verhältnis wird analytisch aus der Minimierung von Gleichung (2.1) gewonnen [3]. Abb. 1b zeigt den qualitativen Feldstärke- und Potentialverlauf in einer solchen Anordnung.

Bei festgelegter Maximalfeldstärke und festgelegter Leiterspannung folgt daraus ein idealer Leiterdurchmesser mit dazugehörigem idealem Außenleiterdurchmesser.



d_a: Durchmesser Innenleiter
d_L: Innendurchmesser Außenleiter

Abb. 1a: Koaxiale Anordnung



Bezugspotential ist das Potential des Außenleiters

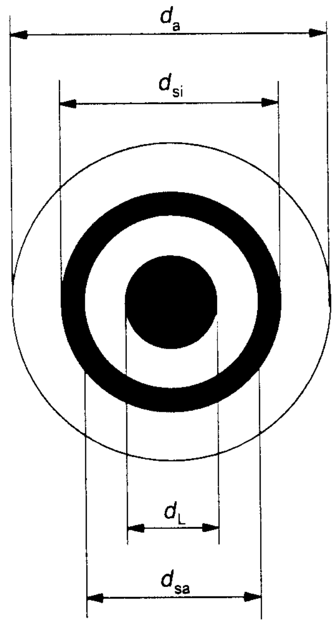
Abb. 1b: Qualitativer Feldstärke- und Potentialverlauf einer koaxialen Anordnung

Die Gleichungen für den idealen Innenleiteraußendurchmesser d_{L22} und den idealen Außenleiterinnendurchmesser d_{a22} einer solchen koaxialen Anordnung lauten:

$$d_{L22} = \frac{2 \cdot U_0}{E_{max}} \tag{3.1}$$

$$d_{a22} = \frac{2 \cdot e \cdot U_0}{E_{max}} \tag{3.2}$$

Die Wahl von Spannung und Isoliermaterial bestimmt somit die Geometrie der Anordnung entscheidend. Dieser Sachverhalt führt bei Kabeln und Rohrleitern, insbesondere wenn sie eine Gasisolierung aufweisen, bei hohen Spannungen zu nicht mehr handhabbaren Dimensionen oder unerwünscht hohen Kosten. Eine Idee, die Außenabmessung der Anordnung zu verringern, besteht darin, eine zusätzliche koaxiale Elektrode zwischen den Innenleiter und den Außenleiter zu plazieren. Diese Steuerelektrode wird von außen, das heißt von den Enden des Kabels her, mit einer geeigneten Beschaltung auf ein solches Potential eingestellt, daß sowohl am Innenleiter als auch am Außenrand der Steuerelektrode die zulässige Maximalfeldstärke nicht überschritten wird (siehe Abb. 2a und 2c).



d_L:Innenleiterdurchmesser
d_{sa}:Außenldurchm. der Steuerelektrode
d_{si}:Innendurchm. der Steuerelektrode
d_a:Innendurchm. des Außenleiters

Abb. 2a: Potentialgesteuerte Anordnung

Dies führt zu einer besseren Ausnutzung der Isolierung und zu einer Reduzierung des Außendurchmessers. Abb. 2b zeigt den qualitativen Feldstärke und Potentialverlauf in einer solchen Anordnung.

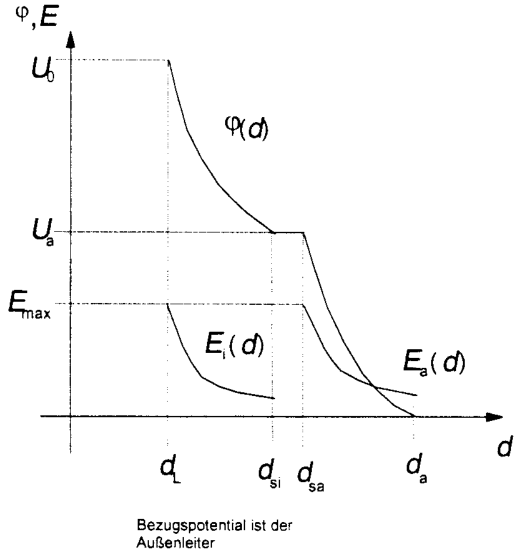


Abb. 2b: Qualitativer Feldstärke- und Potentialverlauf einer gesteuerten Anordnung

Es ergeben sich jedoch Fragen in Bezug auf Position und Gestaltung der Steuerelektrode bzw. der Gesamtdimensionierung der Anordnung. Diese Fragen sind Gegenstand der nachfolgenden Untersuchungen.

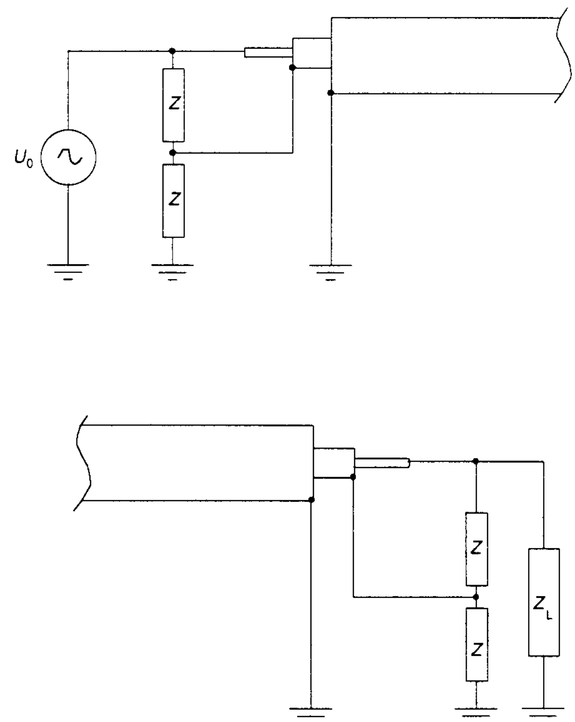


Abb. 2c: Beschaltung einer potentialgesteuerten Anordnung

3. Einfügen einer Steuerelektrode

Gleichung (1) beschreibt die elektrische Feldstärke in gewöhnlichen koaxialen Anordnungen. Eine Anordnung mit Steuerelektrode besteht im Prinzip aus zwei ineinander verschachtelten koaxialen Anordnungen. Daher gilt diese Gleichung sowohl im Innenbereich zwischen Leiter und Steuerelektrode, als auch im Außenbereich zwischen Steuerelektrode und Außenleiter. Bei ideal leitender Steuerelektrode sind Innen- und Außenbereich voneinander unabhängig. Die Spannung U_i zwischen Leiter und Steuerelektrode, sowie die Spannung U_a zwischen Steuerelektrode und Außenleiter sind unbekannt. Allerdings ist ihre Summe gleich der Gesamtspannung U_0 zwischen Leiter und Außenleiter . Vorausgesetzt wird weiterhin daß sowohl im Innen-, als auch im Außenbereich, das gleiche Isoliermaterial mit gleicher Maximalfeldstärke E_{max} verwendet wird. Dann gilt:

$$E_{max} = \frac{U_i}{\ln\left(\frac{d_{Si}}{d_L}\right)} \cdot \frac{2}{d_L} \tag{4.1}$$

$$E_{max} = \frac{U_a}{\ln\left(\frac{d_a}{d_{Sa}}\right)} \cdot \frac{2}{d_{Sa}} \tag{4.2}$$

$$U_i + U_a = U_0 \tag{5}$$

mit dem Innendurchmesser der Steuerelektrode d_{Si} und dem Außendurchmesser der Steuerelektrode d_{Sa}. Das Umstellen der Gleichungen (4.1; 4.2) führt zu:

$$U_i = E_{max} \cdot \frac{d_L}{2} \cdot \ln\left(\frac{d_{Si}}{d_L}\right) \tag{6.1}$$

$$U_a = E_{max} \cdot \left(\frac{d_{Sa}}{2}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_{Sa}}\right) \tag{6.2}$$

Die Division von Gleichung (6.1) durch Gleichung (6.2) ergibt:

$$\frac{U_i}{U_a}=\left[\frac{\ln\left(d_{Si}/d_L\right)}{\ln\left(d_a/d_{Sa}\right)}\right]\cdot\frac{d_L}{d_{Sa}} \tag{7}$$

Weil $U_i = U_0 - U_a$ ist, folgt durch Einsetzten :

$$\frac{U_0-U_a}{U_a}=\left[\frac{\ln\left(d_{Si}/d_L\right)}{\ln\left(d_a/d_{sa}\right)}\right]\cdot\frac{d_L}{d_{Sa}} \tag{8}$$

Die Auflösung nach U_a ergibt:

$$U_a=\frac{U_0}{1+\left[\frac{\ln\left(d_{Si}/d_L\right)}{\ln\left(d_a/d_{Sa}\right)}\cdot\frac{d_L}{d_{Sa}}\right]} \tag{9.1}$$

Das gleiche Verfahren für U_i bringt:

$$U_i=\frac{U_0}{1+\left[\frac{\ln\left(d_a/d_{Sa}\right)}{\ln\left(d_{Si}/d_L\right)}\cdot\frac{d_{Sa}}{d_L}\right]} \tag{9.2}$$

Führt man ein:

$$\frac{\ln\left(d_{Si}/d_L\right)}{\ln\left(d_a/d_{Sa}\right)}\cdot\frac{d_L}{d_{Sa}}=\mathrm{K}_1=\frac{U_i}{U_a} \tag{10}$$

so folgt kurz:

$$U_a=\frac{U_0}{1+\mathrm{K}_1} \tag{11.1}$$

und

$$U_i = \frac{U_0}{1 + \frac{1}{K_1}} \tag{11.2}$$

Hier erhält man also eine Bestimmungsmöglichkeit für die Spannungsaufteilung. Eine Bestimmung der Elektrodengeometrie auf analytischem Wege ist sehr aufwendig. Dazu stehen die Gleichungen (4.1), (4.2) und (5) zur Verfügung. Dieses Gleichungssystem ist jedoch unterbestimmt und teilweise transzendent. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird deshalb eine rechnergestützte Lösung gegeben.

4. Prinzip der rechnergestützten Lösung

Grundidee einer rechnergestützten Lösung ist es, systematisch verschiedene Elektrodenanordnungen durchzurechnen. Dazu wurde ein FORTRAN Programm erstellt, welches ausgehend von einem vorgegebenen Mindestleiterdurchmesser, die Geometrie der Steuerelektrode und des Außenleiters variiert. Zur Beschränkung des Parameterbereiches wird als maximaler Außenleiterinnendurchmesser ein Wert berechnet, der dem einer koaxialen Anordnung ohne Steuerelektrode bei gegebenem Leiterdurchmesser und gegebener Nennspannung entspricht. Der Durchmesser der Steuerelektrode wird schrittweise vergrößert, und für jeden Wert wird der Durchmesser des Außenleiters schrittweise verringert.

Mit den Gleichungen (5; 9.1; 9.2) wird das Potential der Steuerelektrode bestimmt. Die Gleichungen (4.1; 4.2) werden zum Überprüfen der Feldstärke unmittelbar an d_L und d_{Sa} benötigt. Bleibt diese im Innen- und Außenbereich unter der zulässigen, so wird der Wertesatz abgespeichert. Wird die zulässige Feldstärke überschritten, wird der Wertesatz verworfen. Haben Steuerelektrode und Außenleiter nur noch eine Schrittweite Abstand, wird das Verfahren mit einem um eine Schrittweite vergrößertem Innenleiterdurchmesser wiederholt. Das geschieht solange, bis der Innenleiterdurchmesser so groß geworden ist, daß zwischen ihm und dem maximalen Außenleiterdurchmesser kein freier Platz mehr für die Steuerelektrode ist. Damit wird die Berechnung beendet.

Angelegt wird dabei eine Datei, welche alle physikalisch sinnvollen Elektrodenanordnungen in den vorgegebenen bzw. berechneten Parametergrenzen enthält. Dieses Verfahren bringt zwar einen ersten Überblick, hat jedoch auch gravierende Nachteile. Die interessanten Werte müssen mit weiteren Programmen aus dieser Datei herausgesucht werden. Auch belegen solche Dateien sehr viel Speicherplatz, da als größtmöglicher Wert für den Außenleiterdurchmesser automatisch ein Wert berechnet wird, welcher den geringsten Innenleiterdurchmesser ohne Steuerelektrode als Grundlage hat. Insbesondere bei Innenleitern mit geringen Durchmessern und hohen Spannungen führt dies zu großen Werten des Außenleiterdurchmessers, die zwar physikalisch richtig, aber trotzdem technisch unrealistisch sind. Da diese Bereiche durch die Schleifenstruktur des Programms immer mehrmals durchlaufen werden müssen, kosten sie nicht nur Speicherplatz sondern auch Rechenzeit.

Die Optimierung läßt sich sowohl auf minimale Isolierfläche, als auch auf den geringstmöglichen Außenleiterdurchmesser oder den geringsten Kapazitätsbelag durchführen. Für eine Preis-, Gewichts- und Platzreduzierung spielt in erster Linie das metallische Material, hier besonders des Außenleiters, eine wichtige Rolle. Da als Isoliermaterial das gasförmige Schwefelhexafluorid vorgesehen ist, erscheint eine Optimierung auf geringste Isolierfläche nicht sinnvoll. So wurde versuchsweise nach allen drei Optimalwerten gesucht. Dabei stellte sich heraus, daß die Anordnung mit dem kleinsten Durchmesser nicht der mit der kleinsten Isolierfläche entsprach und beide nicht mit der Anordnung für den kleinsten Kapazitätsbelag übereinstimmten.

Zum tieferen Einblick in die gegenseitigen Abhängigkeiten, wurden einige Programme unter FORTRAN erstellt, welche die freie Wahl der Parameterbereiche zulassen. Diese Möglichkeit führt zu deutlich verringertem Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf, macht aber auch eine Kontrolle der Ergebnisse erforderlich, da durch ungeschickte Wahl der Bereiche die Parameter in eine Begrenzung laufen können, was dann zu verfälschten Ergebnissen führt.

Der Verzicht auf die automatische Festlegung der Parameterbereiche führt auch dazu, daß die Kurven nicht mehr komplett über große Bereiche, sondern nur noch in Abschnitten berechnet werden können. Diese können anschließend zusammengesetzt werden.

Die Verknüpfung von Abbruchbedingungen führte in einem Fall zu besonderen Problemen. Es ergab sich ein physikalisch nicht begründbares Schwanken bezüglich der Position der Steuerelektrode. Die Änderung der Variablentypen von "single precision" zu "double precision" erbrachte fast deckungsgleiche Ergebnisse. Daher konnte mangelnde Rechenpräzision allein nicht die Fehlerursache sein. Eine Verbesserung trat erst ein, als für verschiedene Parameter deutlich unterschiedliche Schrittweiten verwendet wurden.

5. Untersuchung diskreter Leiterdurchmesser

Um einen grundsätzlichen Überblick über die Geometrie der Anordnung in technisch interessanten Bereichen zu bekommen, werden willkürlich sieben verschiedene Nennspannungen (65 kV, 110 kV, 250 kV, 400 kV, 500 kV, 750 kV und 1200 kV) sowie elf verschiedene Leiterdurchmesser (12,4 mm, 17,84 mm, 25,24 mm, 36,4 mm, 57,6 mm, 68,2 mm, 78,8 mm, 115,5 mm, 144 mm, 216,5 mm und 346,5 mm) angenommen.

Bei der Berechnung der Leiterquerschnitte aus den Durchmessern werden verschiedene Leiterwanddicken angenommen, siehe dazu Tabelle 1. Dies hat, neben dem Skineffekt, seine Ursache in erster Linie darin, daß die Leiter aus elektrostatischen Gründen mit größeren Durchmessern als für den Querschnitt notwendig ist, gefertigt werden.

d_L			s_L=3 mm	s_L=13 mm	s_L=15 mm	Massiv
mm						
12,4	*A*	mm^2	88,59			120,8
17,84	*A*	mm^2	139,8			250
25,24	*A*	mm^2	209,6			500,3
36,4	*A*	mm^2	314,8	955,7	1008,5	
57,6	*A*	mm^2	514,6	1821,5	2007,5	
68,2	*A*	mm^2	614,5	2254,4	2507	
78,8	*A*	mm^2	714,4	2687,3	3006,5	
115,5	*A*	mm^2	1060	4186,2	4736	
144	*A*	mm^2	1328,9	5350,1	6078,1	
216,5	*A*	mm^2	2012,2	8311,1	9495,5	
346,5	*A*	mm^2	3237,4	13620,4	15621,6	

Tabelle: 1

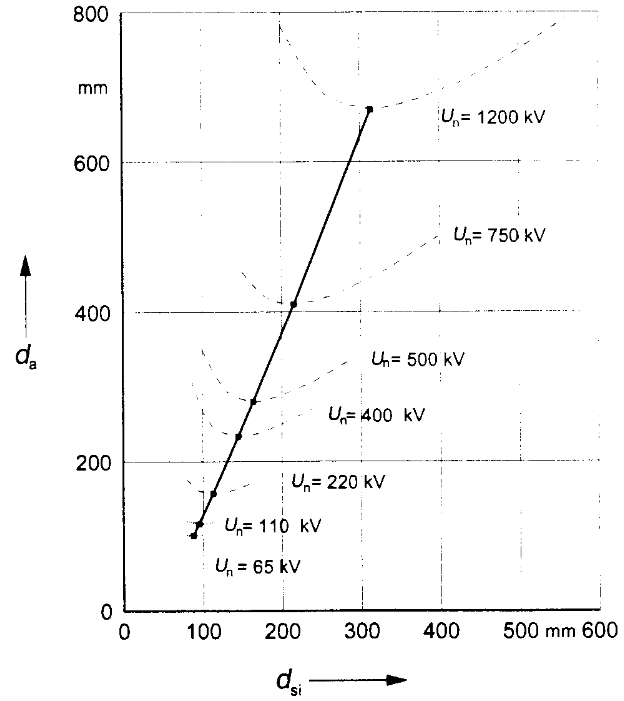
In dieser Tabelle ist s_L die Leiterwanddicke und *A* die bei gegebenem Leiterdurchmesser d_L zu Verfügung stehende Querschnittfläche des Leiters.

Die Steuerelektrode wird als grundsätzlich 1 mm dick angenommen, um eine idealisierende Betrachtung vorläufig zu vermeiden.

Des weiteren wird mit einer Feldstärke im Isoliermedium von maximal 4 kV/mm gerechnet. Dies ist ein Mittelwert [1], der gewählt wurde, um die für einen Vergleich erforderlichen Bedingungen zu schaffen.

Zu verschiedenen möglichen Paarungen aus Nennspannung und Leiterdurchmesser wird die Position der Steuerelektrode und der Außenleiterinnendurchmesser variiert. Dabei wird der kleinstmögliche Außenleiterinnendurchmesser zu jeder angenommenen Position der Steuerelektrode gesucht.

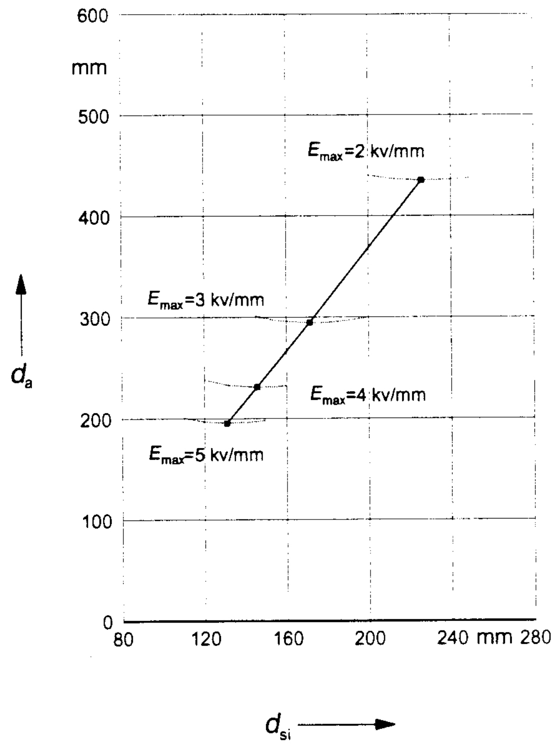
Grundsätzlich ergibt sich dabei der in Abbildung 3a durch gestrichelte Linien dargestellte Verlauf des Außendurchmessers d_a in Abhängigkeit vom Innendurchmesser d_{Si} der Steuerelektrode. Der Leiterdurchmesser blieb dabei konstant.



Gestrichelt : Innendurchmesser Aussenleiter in Abhängigkeit vom Innendurchmesser der Steuerelektrode bei verschiedenen Nennspannungen.
Die durchgezogene Linie verbindet die optimalen Punkte.
Der Leiterdurchmesser beträgt immer 78,8 mm.
Die Maximalfeldstärke ist zu 4 kV/mm gesetzt.
Dicke der Steuerelektrode : 1 mm

Abb. 3a: Innendurchmesser des Außenleiters

Es zeigt sich, das die Minimumpunkte auf Geraden liegen.



Gestrichelt : Innendurchmesser Aussenleiter in
Abhängigkeit vom Innendurchmesser der Steuerelektrode
bei verschiedenen Maximalfeldstärken.
Die durchgezogene Linie verbindet die optimalen Punkte.
Der Leiterdurchmesser beträgt immer 78,8 mm.
Die Leiterspannung ist zu 230,94 kV gesetzt.
Dicke der Steuerelektrode : 1 mm

Abb. 3b: Innendurchmesser des Außenleiters

Tabelle 2a und Tabelle 2b zeigen die zu den jeweiligen Leiterdurchmessern und Spannungsebenen ermittelten geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmesser und die dazu passend optimierten Steuerelektrodendurchmesser.

In Abbildung 4 sind die Minimumpunkte verschiedener Kombinationen aus Leiterdurchmesser und Nennspannung eingetragen. Wie gehabt liegen diese für gleiche Leiterdurchmesser auf Geraden, für gleiche Nennspannungen auf den gestrichelten Kurven.

Diese Betrachtungen führten zu der Erkenntnis, daß die Steuerelektrode für hohe Spannungen, bei relativ geringen Innenleiterdurchmessern, einen größeren Einfluß aufweist, als für dicke Leiter bei niedrigen Spannungen.

d_L			U_n=65 kV	U_n=110 kV	U_n=220 kV	U_n=400 kV
mm			U_0=37,528 kV	U_0=63,5085 kV	U_0=127,017 kV	U_0=230,94 kV
12,4	d_a	mm	39	61,25	126	246
12,4	d_{si}	mm	22,8	31,5	56	100,5
17,84	d_a	mm	43	63,25	122	235
17,84	d_{si}	mm	28	36,125	59	101
25,24	d_a	mm	49,2	67,75	122	225
25,24	d_{si}	mm	35,2	43	64,5	103,5
36,4	d_a	mm	59,5	76,5	125	220
36,4	d_{si}	mm	46,3	53,625	73,5	110,5
57,6	d_a	mm	80	95,5	139	222
57,6	d_{si}	mm	67,4	74,375	93	126,5
68,2	d_a	mm	90,4	105,5	148	227
68,2	d_{si}	mm	77,9	84,75	103,5	136
78,8	d_a	mm	100,8	115,75	157	233
78,8	d_{si}	mm	88,5	95,375	113	145
115,5	d_a	mm				260
115,5	d_{si}	mm				180
144	d_a	mm				283
144	d_{si}	mm				207
216,5	d_a	mm				349
216,5	d_{si}	mm				278
346,5	d_a	mm				474
346,5	d_{si}	mm				407

Tabelle: 2a ($E_{max} = 4\,\text{kV}/\text{mm}$; $Dicke\,(Si) = 1\,\text{mm}$)

Des weiteren beeinflußt der Durchmesser des Innenleiters sehr stark den minimal möglichen Außenleiterdurchmesser.

Ähnlich wie bei ungesteuerten Anordnungen gibt es zu jeder Spannung einen idealen Leiterdurchmesser. So geht aus Abbildung 4 hervor, daß, bei einem E_{max} von 4 kV/mm, ein Leiterdurchmesser von 78,8 mm für 65 kV Nennspannung zu groß ist. Bei einer Nennspannung von 400 kV ist er schon näher am Optimum, und bei 1200 kV ist er zu klein.

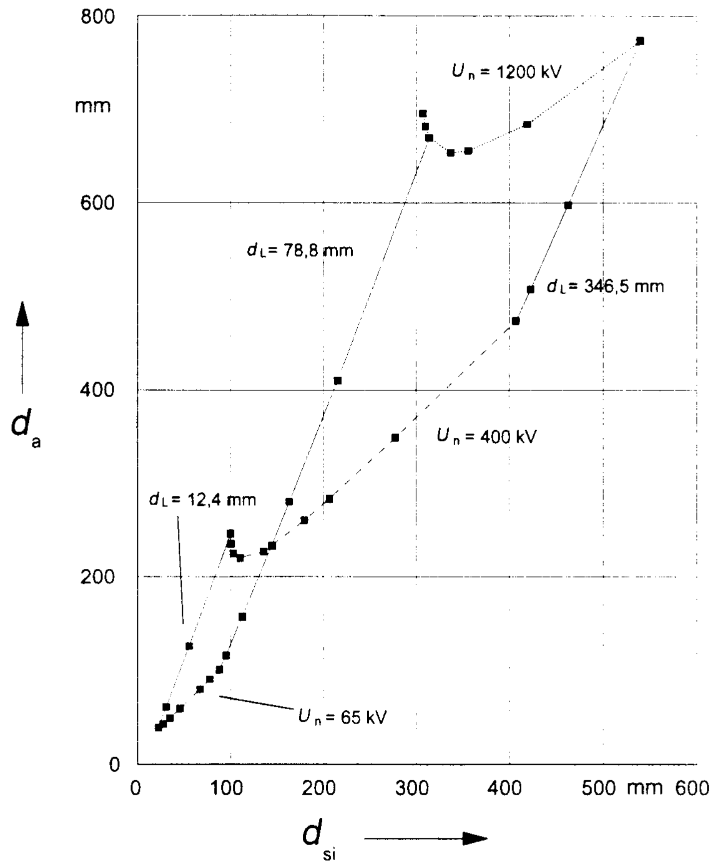
d_L			U_n=500 kV	U_n=750 kV	U_n=1200 kV
mm			U_0=288,675 kV	U_0=433,013 kV	U_0=692,82 kV
57,6	d_a	mm	274	414	696
57,6	d_{si}	mm	148	201	307
68,2	d_a	mm	246	410	682
68,2	d_{si}	mm	156	207	310
78,8	d_a	mm	280	410	670
78,8	d_{si}	mm	164	216	314
115,5	d_a	mm	302	418	654
115,5	d_{si}	mm	194	245	337
144	d_a	mm	324	434	656
144	d_{si}	mm	225	271	359
216,5	d_a	mm	386	484	684
216,5	d_{si}	mm	294	337	419
346,5	d_a	mm	508	598	774
346,5	d_{si}	mm	423	463	540

Tabelle: 2b ($E_{max} = 4\,kV/mm$; *Dicke* $(Si) = 1\,mm$)

Um den Einfluß der zulässigen Feldstärke zu untersuchen, wird in Abbildung 3b der kleinstmögliche Außenleiterinnendurchmesser in Abhängigkeit von der Steuerelektrodenposition dargestellt, abweichend von Abbildung 3a nun für eine feste Nennspannung von 400 kV, aber verschiedene zulässige Feldstärken (2 kV/mm, 3 kV/mm, 4 kV/mm und 5 kV/mm). Die Dicke der Steuerelektrode beträgt hierbei wie in Abbildung 3a ebenfalls 1 mm, und der Leiterdurchmesser 78,8 mm.

Ähnlich wie in Abbildung 3a zeigt sich hier, daß die Minimumpunkte auf Geraden liegen.

Abbildung 5 zeigt wiederum für einen festen Leiterdurchmesser und eine feste Nennspannung die Abhängigkeit des kleinstmöglichen Außenleiterinnendurchmessers vom Innendurchmesser der Steuerelektrode.

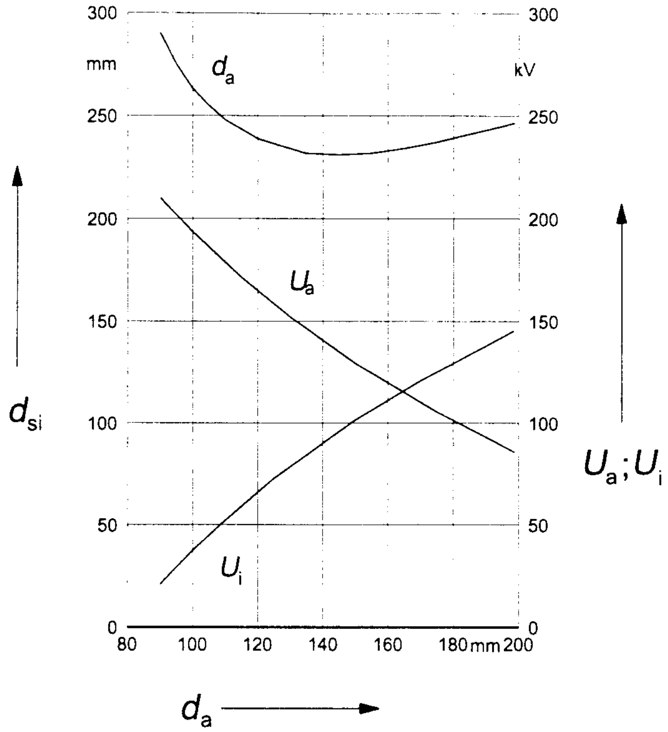


Gestrichelt : Minimumpunkte mit gleicher Nennspannung.
Durchgezogen: Minimumpunkte mit gleichem Leiterdurchmesser.
Dicke der Steuerelektrode : 1 mm
Die Maximalfeldstärke wurde zu 4 kV/mm gesetzt.

Abb. 4: Idealer Leiterdurchmesser in Abhängigkeit der Nennspannung

In dieser Darstellung zeigt sich das breite, flache Minimum der Kurve. Es ist daher zu erwarten, daß bei der technischen Konstruktion eines optimierten Kabels oder Rohrleiters eine leichte Durchmesserabweichung der Steuerelektrode tolerierbar ist.

Abbildung 5 zeigt auch den Verlauf der Teilspannungen U_i und U_a in Abhängigkeit vom Durchmesser der Steuerelektrode.



Innenleiterdurchmesser : 78,8 mm
Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
Maximalfeldstärke : 4 kV/mm
U_n = 400 kV U_0 = 230,94 kV

Abb. 5

6. Untersuchung variabler Leiterdurchmesser

6.1 Variation der Parameter

Zur näheren Untersuchung der quantitativen Zusammenhänge wurde ein FORTRAN Programm erstellt, daß für eine festgelegte Nennspannung den Wert des Innenleiterdurchmessers variiert. Dazu wird durch systematisches Variieren die optimale Position der Steuerelektrode mit dem geringstmöglichen Außenleiter-innendurchmesser gesucht.

Um eine Vergleichsmöglichkeit zu haben, wird auch für eine konventionelle koaxiale Anordnung ohne Steuerelektrode bei einer festen Nennspannung der minimal mögliche Außenleiterdurchmesser in Abhängigkeit vom Innenleiter-durchmesser berechnet. Um den Aufwand zu reduzieren, erfolgt eine Beschränkung auf die vier Spannungsebenen 110 kV, 400 kV, 750 kV und 1200 kV. Die Steuerelektrode wird hier als unendlich dünn angenommen.

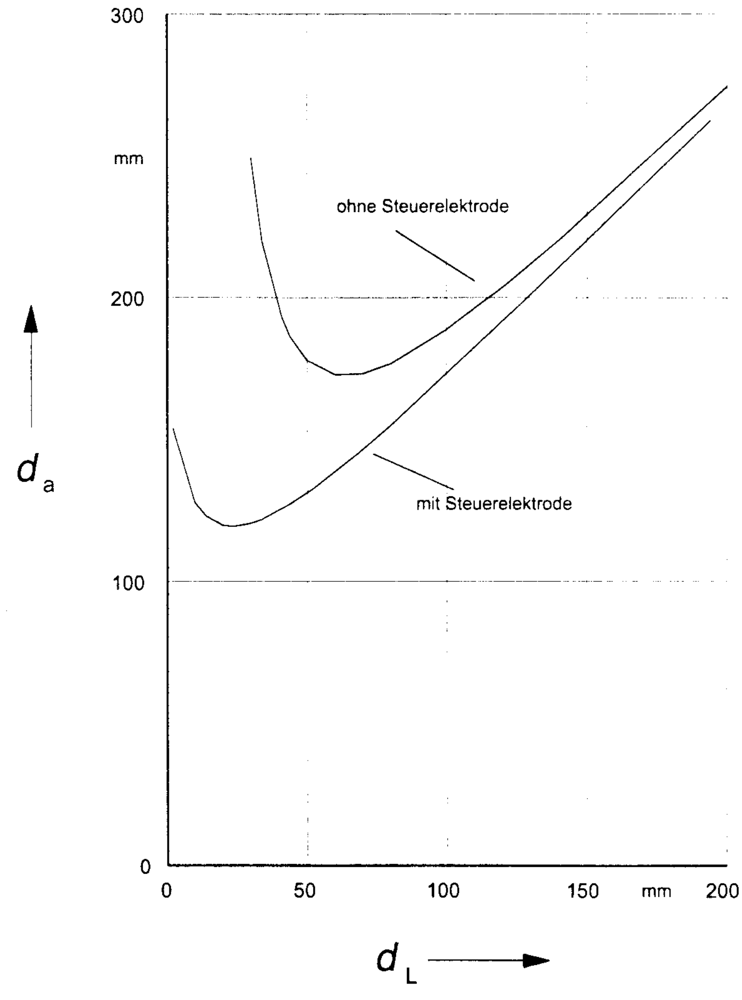
Da bei unterschiedlichen Betriebsspannungen die maximale Betriebsfeldstärke von SF_6 Isolierungen unterschiedlich gewählt wird, werden hier ebenfalls unterschiedliche E_{max} verwendet, und zwar E_{max}=2 kV/mm für U_0=110 kV, E_{max}=3 kV/mm für U_0=400 kV, E_{max}=4 kV/mm für U_0=750 kV, und E_{max}=5 kV/mm für U_0=1200 kV.

Diese Werte sind der Literatur entnommem [7; 8]. Sie haben ihren Ursprung darin, daß SF_6 eine effektive Dauerfeldstärke bei Wechselspannungsbeanspruchung von ca. 6,7 kV/mm ertragen kann. Die maximale Feldstärke für Schaltstoßspannungen darf aber 12-13,6 kV/mm, und für Blitzstoßspannungen 15,8-16,8 kV/mm betragen. Für Rohrleiter gelten in der Praxis im allgemeinen etwas niedrigere Werte, da es durch den Zusammenbau am Betriebsort zu Verunreinigungen durch Staub kommen kann. Bei Kabeln ist dies nicht der Fall [7].

Zusätzlich begrenzt die maximal auftretende Dauerüberspannung den Wert für E_{max}. Diese kann bei nicht im Sternpunkt geerdeten Netzen auf das $\sqrt{3}$-fache der höchstzulässigen Betriebsspannung ansteigen. Bei geerdeten Netzen muß immer

noch mit dem 1,3- bis 1,5-fachen der höchstzulässigen Betriebsspannung gerechnet werden.

Zunächst wird in den Abbildungen 6a bis 6d die grundsätzliche Abhängigkeit des Außenleiterinnendurchmessers vom Innenleiterdurchmesser dargestellt, und zwar gemeinsam für Anordnungen mit und ohne Steuerelektrode. Für nähere Untersuchungen erscheint es sinnvoll, gezielt Fixpunkte der Kurven miteinander zu vergleichen. Als Fixpunkte werden die Leiterdurchmesser mit jeweils geringstmöglichem Außenleiterinnendurchmesser gewählt.

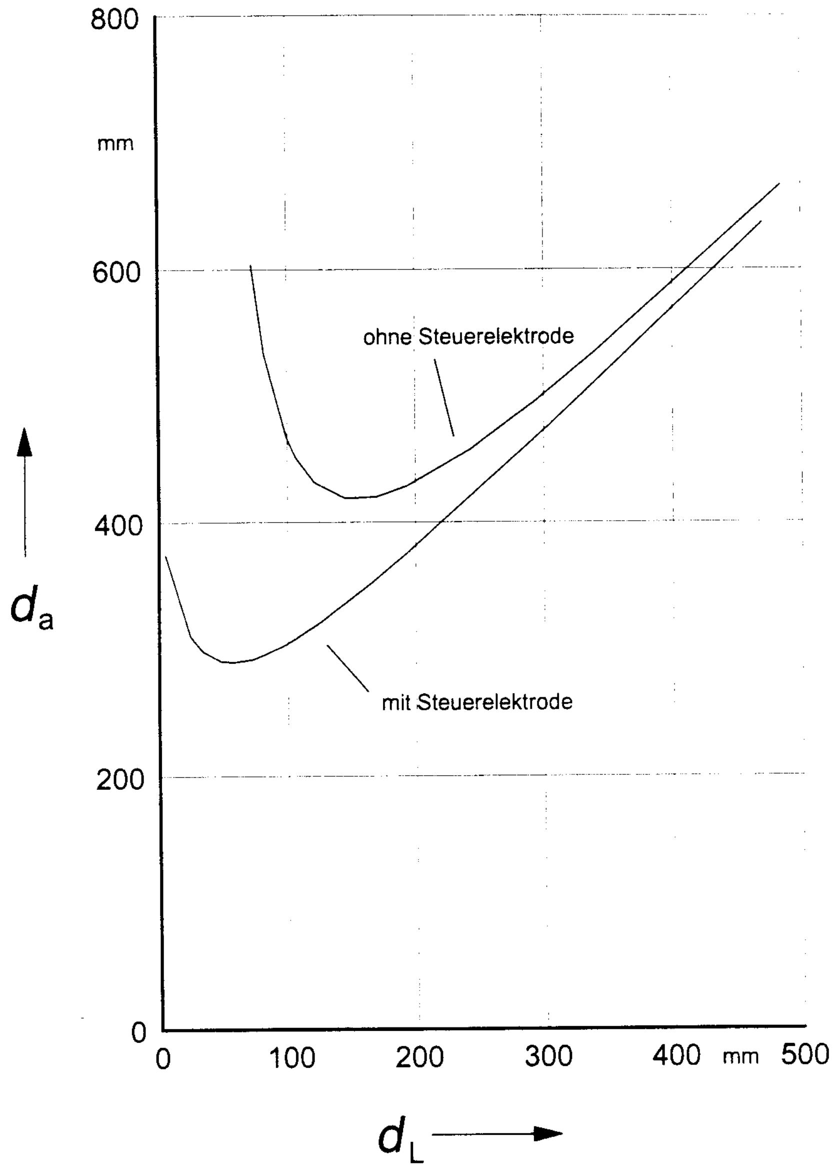


U_n=110 kV U_0=63,5085 kV

E_{max} = 2 kV/mm

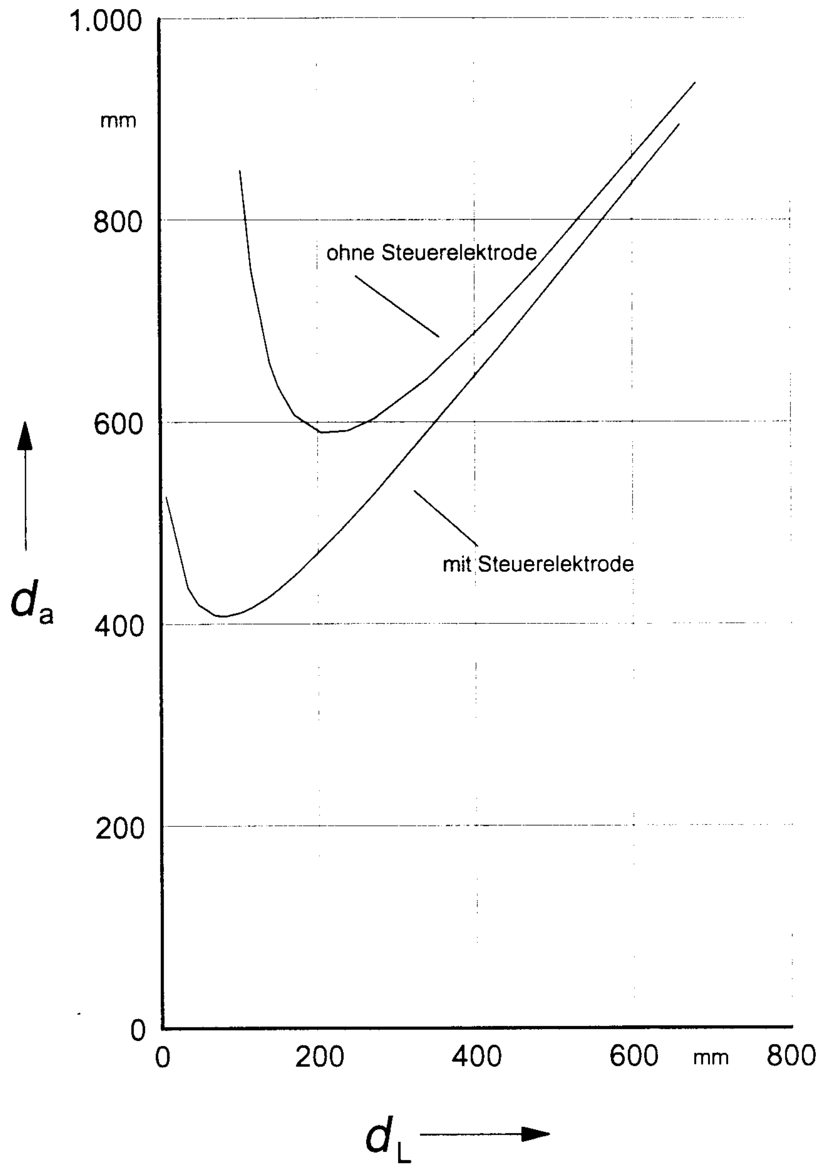
Dicke der Steuerelektrode : 0 mm

Abb. 6a



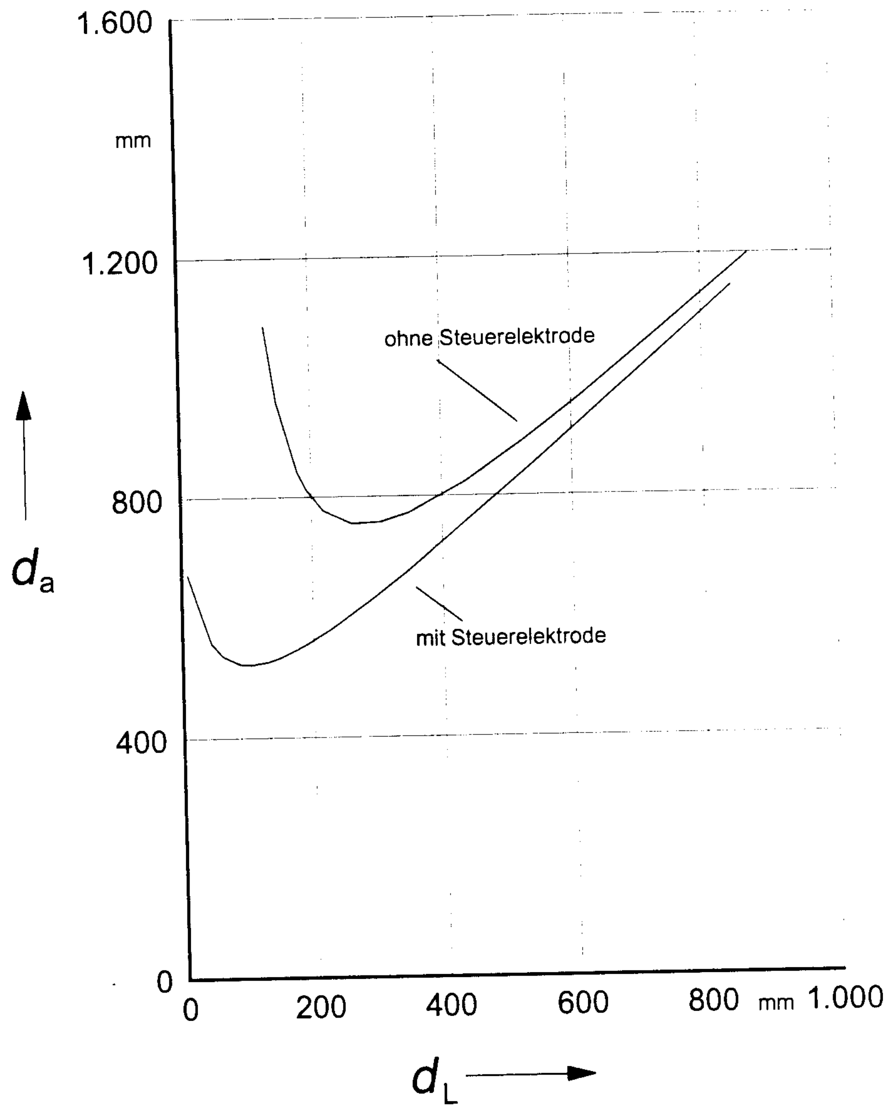
Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n= 400 kV E_{max}=3 kV/mm
U_0 = 230,94 kV

Abb. 6b



Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n = 750 kV U_0 = 433,013 kV
E_{max} =4 kV/mm

Abb. 6c



Dicke der Steuerelektrode : 0 mm

U_h= 1200 kV U_0= 692,82 kV

E_{max}=5 kV/mm

Abb. 6d

Wegen der starken, physikalisch nicht begründbaren, Schwankungen in der Position der Steuerelektrode ist zur präziseren Bestimmung der Abmessungen in den Fixpunkten ein auf die Problematik angepaßtes Programm notwendig. Die Schwankungen, die durch Verknüpfen mehrerer Abbruchbedingungen und durch die Grenzen der numerischen Präzision erklärt werden können, konnten durch eine

Staffelung und Verfeinerung der Schrittweiten zur Variation der Parameter deutlich verringert werden. Eine Maßnahme, die eine deutliche Zunahme an Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf zur Folge hatte. Allerdings wirkt sich diese Schwankung, wie auch aus dem flachen Verlauf der Kurve für d_a in Abbildung 5 ersichtlich, nur gering auf den Außenleiterdurchmesser aus. Daher kann diese Unpräzision für die Darstellungen in Abbildung 6 hingenommen werden, zumal auch auf die Darstellung der Steuerelektrode verzichtet wurde.

Aus diesen Feinuntersuchungen im Bereich der Minima wurden die in Tabelle 3a bzw. 3b verwendeten Werte gewonnen. In Zeile 1-8 finden sich die vom Programm gelieferten Daten. Die weiteren Zeilen enthalten verschiedene Relationen zwischen dem Quotienten E_{max}/U_0 und diversen Durchmessern. Tabelle 3b enthält einige über verschiedene Spannungsebenen gemittelten Werte.

Allgemein gilt: Die Dicke der Steuerelektrode ist unendlich dünn, daher gilt : $d_{Si} = d_{Sa}$. Der Index $_{11}$ kennzeichnet Werte für eine auf geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmesser d_L optimierten potentialgesteuerten Anordnung.
Der Index $_{22}$ kennzeichnet Werte für eine auf geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmesser d_L optimierten ungesteuerten Anordnung.
Der Index $_{12}$ kennzeichnet Werte, bei denen der optimierte Leiterdurchmesser $d_{L\,11}$ einer potentialgesteuerten Anordnung übernommen wird, ansonsten aber ohne Steuerelektrode gerechnet wird.
Der Index $_{21}$ kennzeichnet Werte, bei denen der optimierte Leiterdurchmesser $d_{L\,22}$ einer ungesteuerten Anordnung übernommen wird, ansonsten aber mit Steuerelektrode gerechnet wird.

1. Zeile : $d_{a\,11}$, geringstmöglicher Außenleiterinnendurchmesser einer potentialgesteuerten Anordnung.
2. Zeile : $d_{Si\,11}$, zu $d_{a\,11}$ optimierter Wert des Steuerelektrodeninnendurchmessers.
3. Zeile : $d_{L\,11}$, zu $d_{a\,11}$ optimierter Wert des Innenleiterdurchmessers.
4. Zeile : $d_{a\,12}$, geringstmöglicher Außenleiterinnendurchmesser einer ungesteuerten Anordnung, die den Leiterdurchmesser $d_{L\,11}$ der optimierten potentialgesteuerten Anordnung übernimmt.

Nr.:			U_n=110 kV U_0=63,5085 kV E_{max}=2 kV/mm	U_n=400 kV U_0=230,94 kV E_{max}=3 kV/mm	U_n=750 kV U_0=433,013 kV E_{max}=4 kV/mm	U_n=1200 kV U_0=69,82 kV E_{max}=5 kV/mm
1	d_{a11}	mm	119,49	289,67	407,36	521,42
2	d_{si11}	mm	63,52	153,99	216,54	277,18
3	d_{L11}	mm	23,38	56,67	79,71	102
4	d_{a12}	mm	353,626	857,504	1205,4	1543
5	d_{a21}	mm	141,5	342,9	482,2	617,2
6	d_{si21}	mm	99	242,4	337,15	432,5
7	d_{a22}	mm	172,634	418,507	588,526	753,312
8	d_{L22}	mm	63,5085	153,96	216,506	277,128
9	$d_{a11} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$		3,7631	3,7629	3,763	3,763
10	$d_{si11} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$		2,0004	2,0003	2,0003	2,0003
11	$d_{L11} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$		0,7363	0,7361	0,7363	0,7361
12	$\frac{d_{a11}}{d_{si11}}$		1,8811	1,8811	1,8812	1,8812
13	$\frac{d_{si11}}{d_{L11}}$		2,7168	2,7173	2,7166	2,7174
14	$\frac{d_{a11}}{d_{a12}} \cdot 100$	%	33,79	33,78	33,79	33,79
15	$\frac{d_{a11}}{d_{a22}} \cdot 100$	%	69,22	69,215	69,22	69,22
16	$\frac{d_{a21}}{d_{a22}} \cdot 100$	%	81,965	81,934	81,935	81,93
17	$\frac{d_{a21}}{d_{si21}}$		1,429	1,414	1,43	1,427
18	$\frac{d_{si21}}{d_{L22}}$		1,559	1,574	1,557	1,561
19	$\frac{d_{a22}}{d_{L22}}$		2,718	2,718	2,718	2,718
20	$\frac{d_{a12}}{d_{L11}}$		15,125	15,131	15,122	15,127

Tabelle: 3a

5. Zeile : d_a21 , geringstmöglicher Außenleiterinnendurchmesser einer potentialgesteuerten Anordnung, welche den Leiterdurchmesser d_L22 der optimierten ungesteuerten Anordnung übernimmt.

6. Zeile : $d_{Si}21$, Innendurchmesser der Steuerelektrode einer gesteuerten Anordnung, die den Leiterdurchmesser d_L22 der optimierten ungesteuerten Anordnung übernimmt.

7. Zeile : d_a22 , geringstmöglicher Außenleiterinnendurchmesser einer ungesteuerten Anordnung.

8. Zeile : d_L22 , zu d_a22 optimierter Innenleiterdurchmesser.

9. Zeile : ; $d_{a11} \cdot E_{max}/U_0$; Normierter Außenleiterinnendurchmesser einer optimierten potentialgesteuerten Anordnung.

10. Zeile: $d_{si11} \cdot E_{max}/U_0$; Normierter Steuerelektrodeninnendurchmesser einer optimierten potentialgesteuerten Anordnung.

11. Zeile : $d_{L11} \cdot E_{max}/U_0$; Normierter Innenleiterdurchmesser einer optimierten potentialgesteuerten Anordnung.

12. Zeile : d_{a11} / d_{Si11}, Verhältnis Außenleiterinnendurchmesser zu Steuerelektrodeninnendurchmesser optimierten potentialgesteuerten Anordnung.

13. Zeile : d_{Si11} / d_{L11}, Verhältnis Steuerelektrodeninnendurchmesser zu Innenleiterdurchmesser einer optimierten potentialgesteuerten Anordnung.

14. Zeile : $(d_{a11}/d_{a12}) \cdot 100\%$, Vergleich des Außenleiterinnendurchmessers einer optimierten Anordnung mit Steuerelektrode gegenüber dem einer ungesteuerten Anordnung, die den Leiterdurchmesser d_L11 einer optimierten Anordnung mit Potentialsteuerung übernimmt.

15. Zeile : $(d_{a11}/d_{a22}) \cdot 100\%$, Vergleich des Außenleiterinnendurchmessers einer optimierten Anordnung mit Potentialsteuerung zur optimierten Anordnung ohne Potentialsteuerung.

16. Zeile : $(d_{a21}/d_{a22}) \cdot 100\%$, Vergleich des Außenleiterinnendurchmessers einer potentialgesteuerten Anordnung, die den Leiterdurchmesserd_L22 einer optimierten ungesteuerten Anordnung übernimmt, mit dem Außenleiterinnendurchmesser eben dieser Anordnung.

17. Zeile : d_{a21} / d_{Si21}, Verhältnis Außenleiterinnendurchmesser zu Innendurchmesser Steuerelektrode einer Anordnung mit Steuerelektrode, welche den Leiterdurchmesser d_L22 einer optimierten Anordnung ohne Steuerelektrode übernimmt.

18. Zeile : d_{Si21} / d_{L22}, Verhältnis Steuerelektrodeninnendurchmesser zu Innenleiterdurchmesser einer Anordnung mit Potentialsteuerung, welche den Leiterdurchmesser $d_{L}22$ einer optimierten ungesteuerten Anordnung übernimmt.

19. Zeile : d_{a22}/d_{L22} , Verhältnis Außenleiterinnendurchmesser zu Innenleiterdurchmesser einer optimierten ungesteuerten Anordnung ergibt sich immer zu 2,718=e [3].

Entspricht Zeilen-Nummer aus Tabelle 2.1:	Physikalischer Zusammenhang	Einheit	Arithmetischer Mittelwert aus Tabelle 2.1
9	$d_{a11} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	-	3,763
10	$d_{si11} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	-	2,0003
11	$d_{L11} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	-	0,7362
12	$\frac{d_{a11}}{d_{si11}}$	-	1,88115
13	$\frac{d_{si11}}{d_{L11}}$	-	2,717
14	$\frac{d_{a11}}{d_{a12}} \cdot 100$	%	33,7875
15	$\frac{d_{a11}}{d_{a22}} \cdot 100$	%	69,21875
16	$\frac{d_{a21}}{d_{a22}} \cdot 100$	%	81,941
17	$\frac{d_{a21}}{d_{si21}}$	-	1,425
18	$\frac{d_{si21}}{d_{L22}}$	-	1,56275
19	$\frac{d_{a22}}{d_{L22}}$	-	$\approx e$
20	$\frac{d_{a12}}{d_{L11}}$	-	$\approx e^{e}$

Tabelle: 3b

20. Zeile : d_{a12}/d_{L11} , Verhältnis Außenleiterinnendurchmesser zu Innenleiterdurchmesser einer ungesteuerten Anordnung, die den Innenleiterdurchmesser d_{L11} einer optimierten potentialgesteuerten Anordnung übernimmt.

6.2 ERGEBNISSE

Wichtigstes Ergebnis ist, daß für die gewählten Fixpunkte zum einen eine Normierung nach dem Quotienten aus maximaler Betriebsfeldstärke und Leiterspannung möglich ist, zum anderen feste Werte für Verhältnisse in der Elektrodengeometrie bestehen. Somit gibt es bei einer Anordnung mit Steuerelektrode auch zu jedem Quotienten E_{max}/U_0 einen idealen Innenleiterdurchmesser mit festgelegten idealen Verhältnissen d_{a11}/d_{Si11} und d_{Si11}/d_L, welche die Elektrodengeometrie bestimmen. Der Mittelwert aus allen betrachteten Nennspannungen für den idealen Quotienten d_{a11}/d_{Si11} beträgt 1,88115 und für d_{Si11}/d_{L11} 2,717 (aus Tabelle 3b). Der ideale Innenleiterdurchmesser zu einer gegebenen Nennspannung beträgt:

$$d_{L11} = \frac{U_0}{E_{max}} \cdot K_2 \qquad (12.1)$$

mit

$K_2 = 0{,}7362$ (Tabelle 3b, Zeile 11)

Nach obigen Angaben für die Quotienten d_{Si11}/d_{L11} und d_{a11}/d_{Si11} folgt weiter:

$$d_{si11} = \frac{U_0}{E_{max}} \cdot K_3 = d_{L11} \cdot K_5 \qquad (12.2)$$

mit

$K_3 = 2$ und $K_5 = 2{,}717$ (Tabelle 3b, Zeile 10, Zeile 13)

sowie:

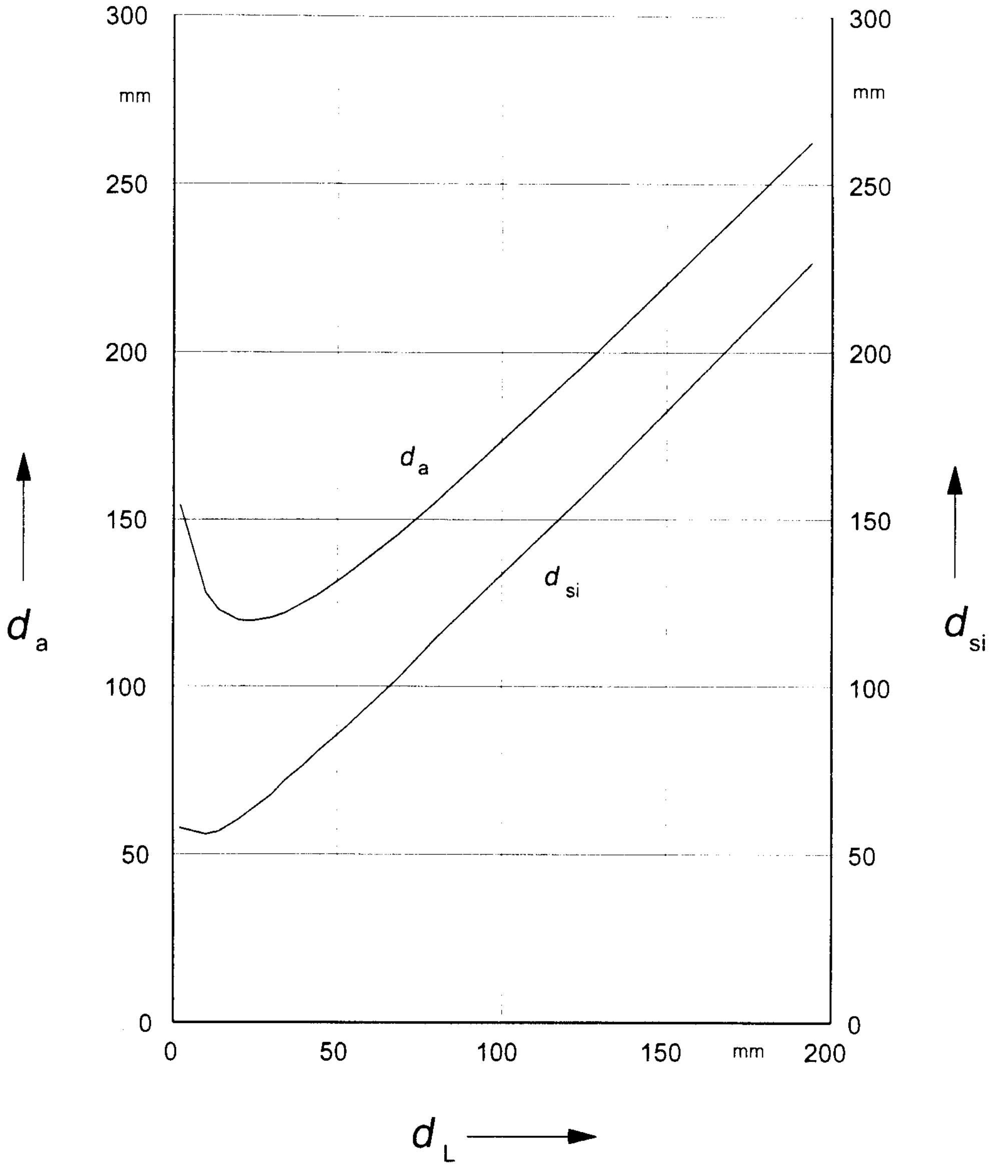
$$d_{a11} = \frac{U_0}{E_{max}} \cdot K_4 = d_{si11} \cdot K_6 \qquad (12.3)$$

mit:

$K_4 = 3{,}763$ und $K_6 = 1{,}88115$ (Tabelle 3b, Zeile 9, Zeile 12)

Der Vergleich der idealen Abmessungen von Anordnungen mit und ohne Steuerelektrode zeigt, daß eine optimierte Anordnung ohne Steuerelektrode durch Einfügen der Steuerelektrode auf ca. 82% ihres ursprünglichen Außendurchmessers verkleinert werden kann (Tabelle 3b, Zeile 16). Grundsätzlich beträgt der Durchmesser einer optimierten Anordnung mit Steuerelektrode gegenüber einer entsprechenden optimierten Anordnung ohne Steuerelektrode ca. 70% (Tabelle 3b, Zeile 15). Noch weitaus größer wird die Einsparung beim Vergleich einer optimierten potentialgesteuerten Anordnung mit einer ungesteuerten Anordnung gleichen Innenleiterdurchmessers. Hier beträgt die Einsparung ca. 34%.(Tabelle 3b, Zeile 14).

Abbildung 7a-7d zeigen die Abhängigkeit der optimalen Steuerelektrodenposition und des geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmesser vom Innenleiter-durchmesser bei verschiedenen Nennspannungen.

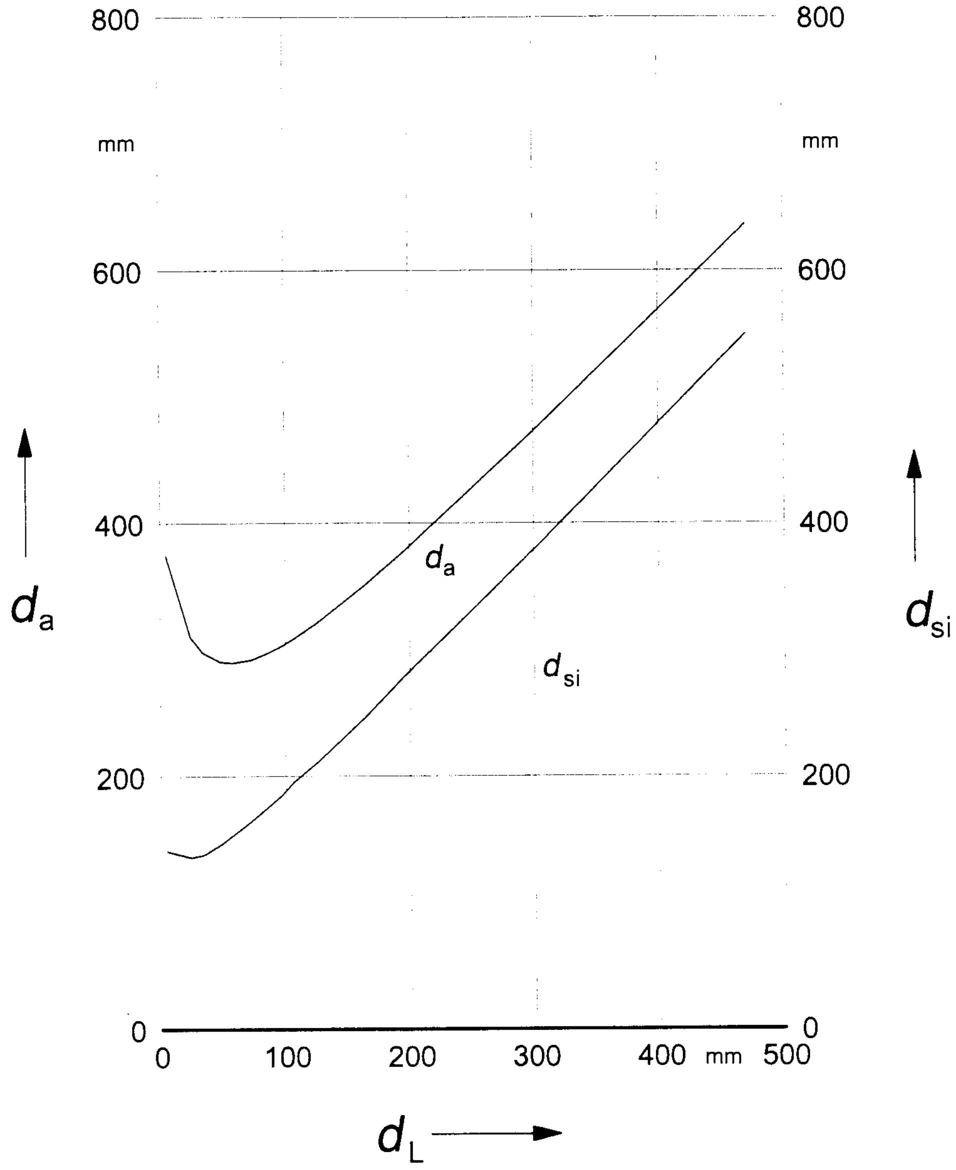


Dicke der Steuerelektrode : 0 mm

U_n = 110 kV E_{max} =2 kV/mm

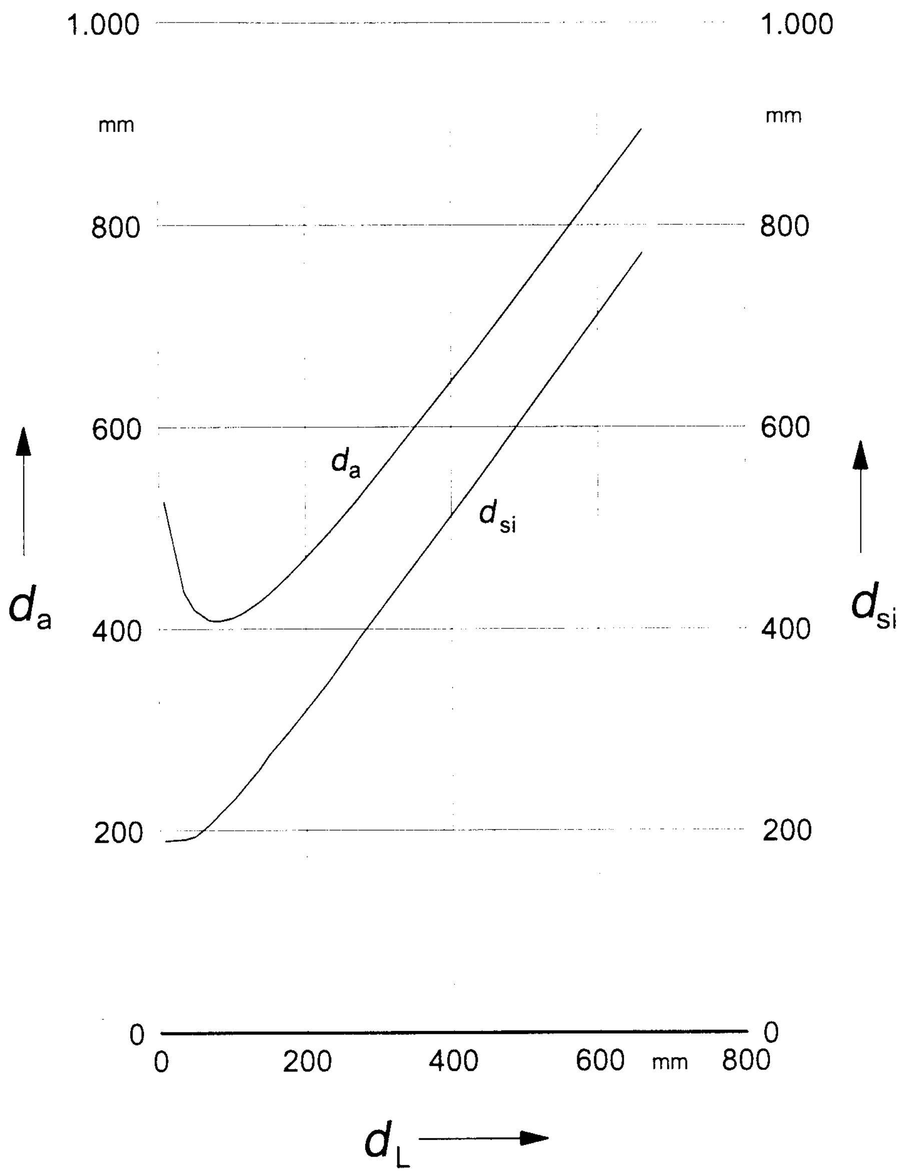
U_0 = 63,5085 kV

Abb. 7a:



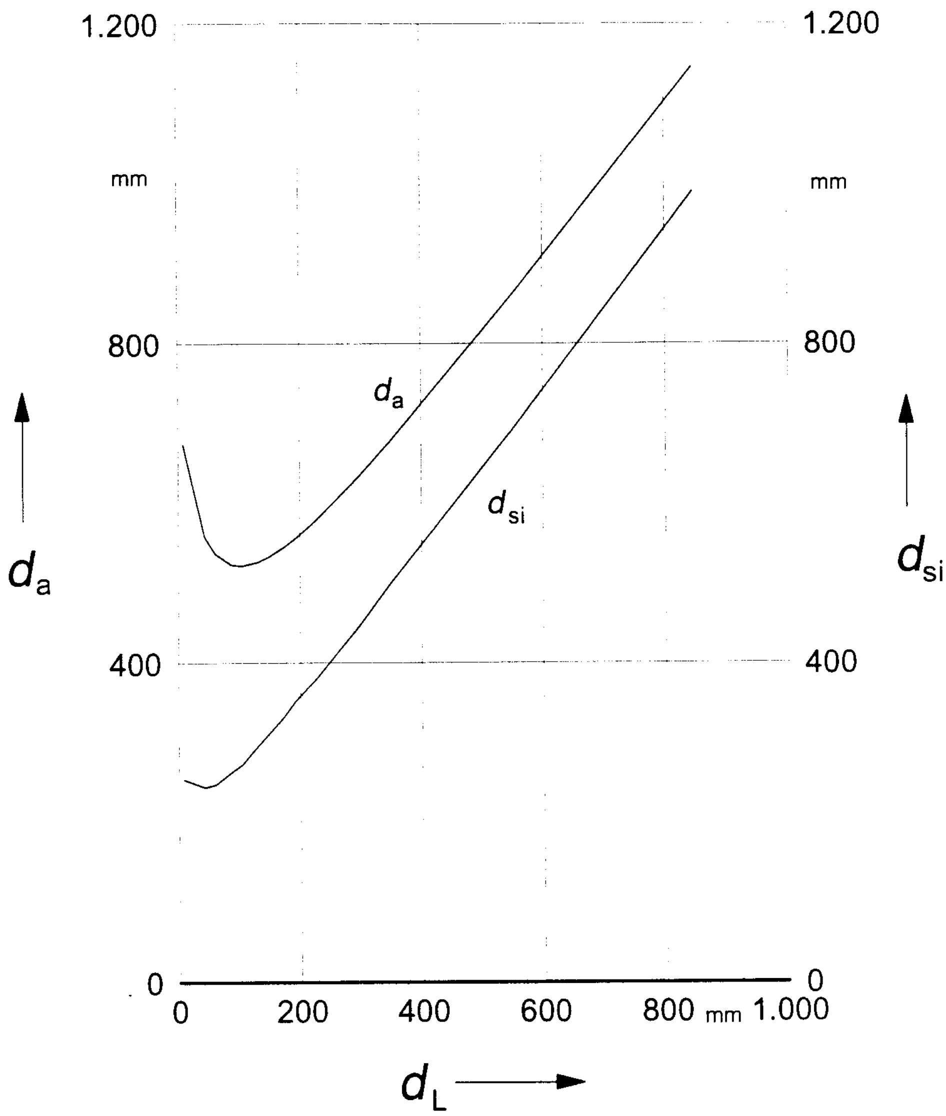
Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n= 400 kV E_{max}=3 kV/mm
U_0 = 230,94 kV

Abb. 7b:



Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n = 750 kV U_0 = 433,013 kV
E_{max} =4 kV/mm

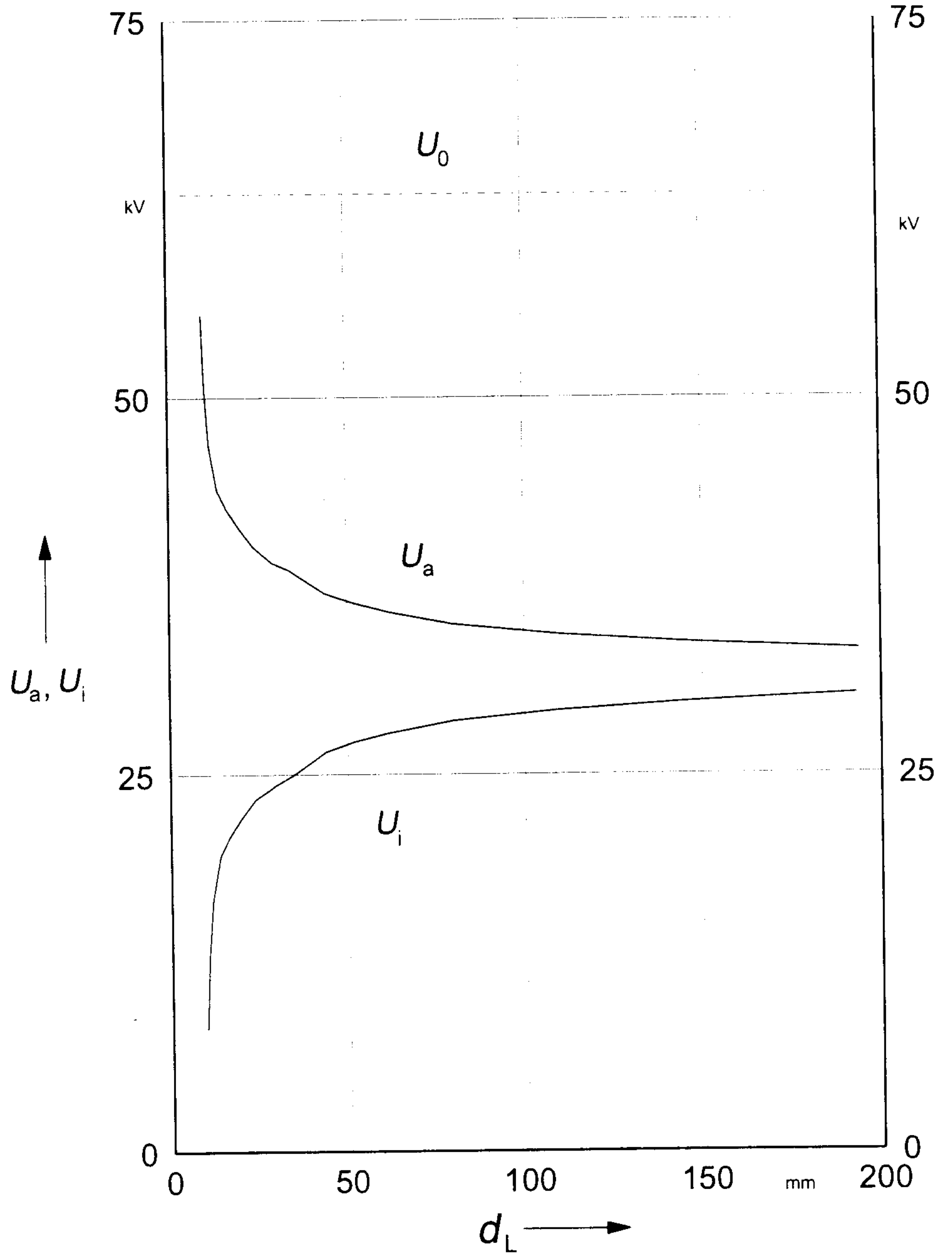
Abb. 7c:



Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n= 1200 kV U_0= 692,82 kV
E_{max}=5 kV/mm

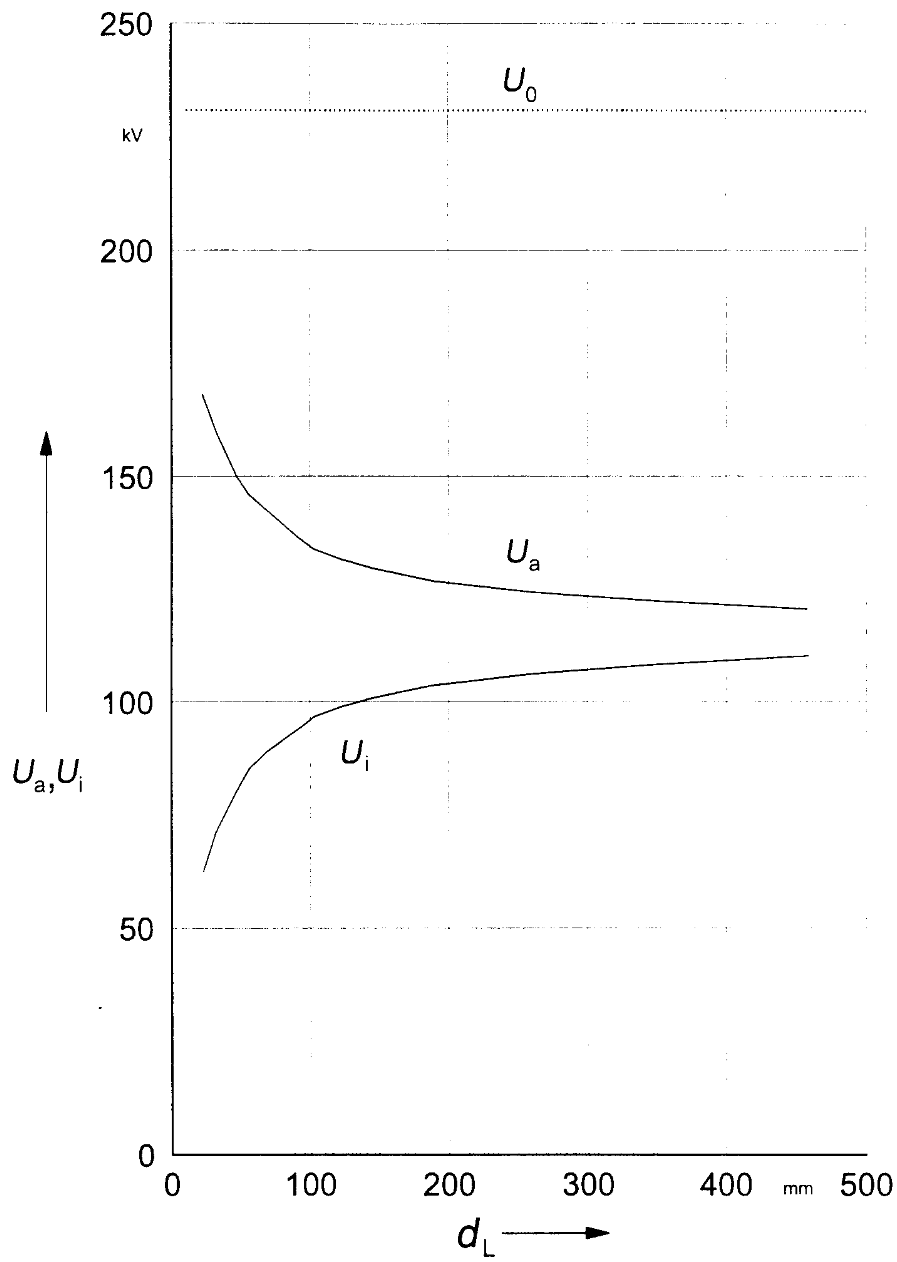
Abb. 7d:

Abbildung 8a-8d zeigen die Verteilung der Gesamtleiterspannung U_0 auf die Teilspannungen U_i und U_a im Innen- und Außenbereich, wiederum in Abhängigkeit des Innenleiterdurchmessers d_L.



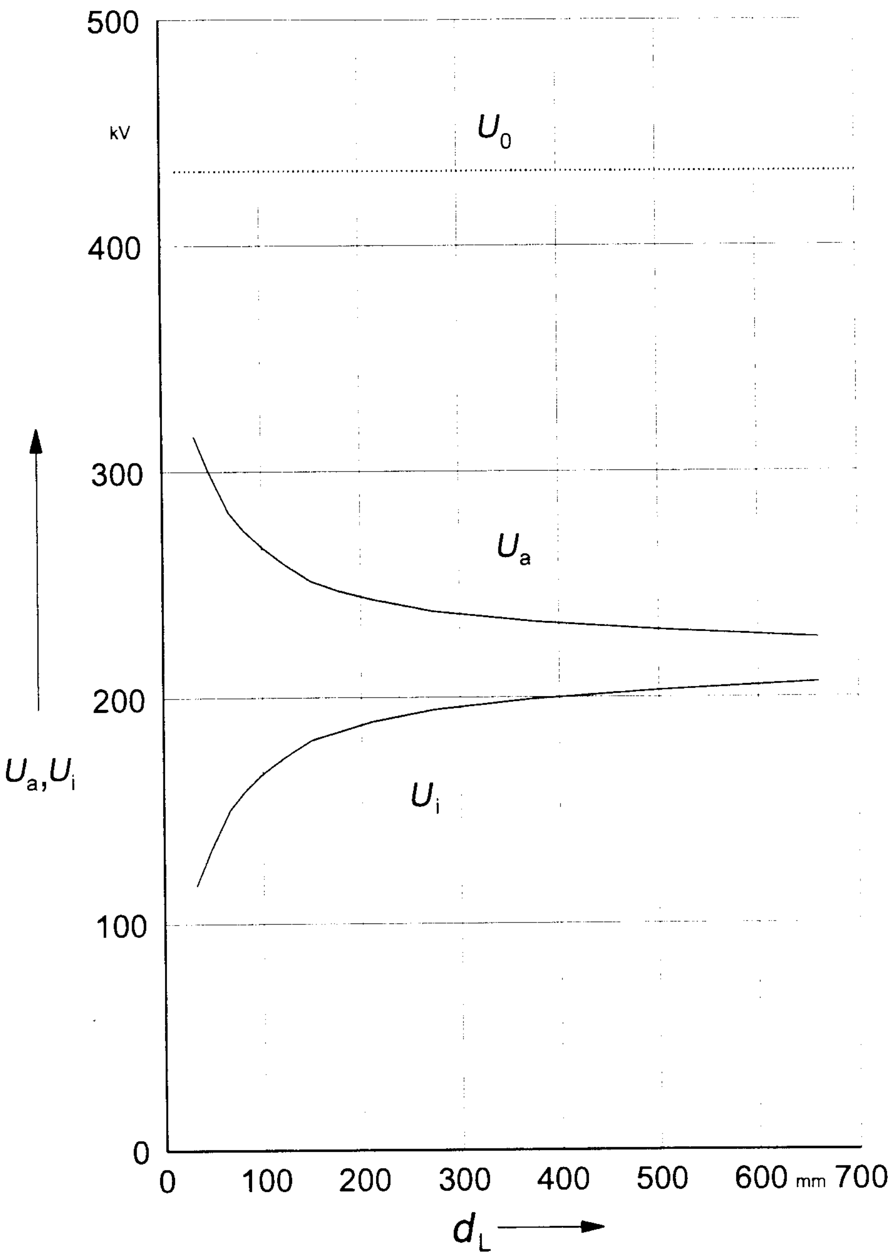
Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n = 110 kV E_{max} =2 kV/mm
U_0= 63,5085 kV

Abb. 8a



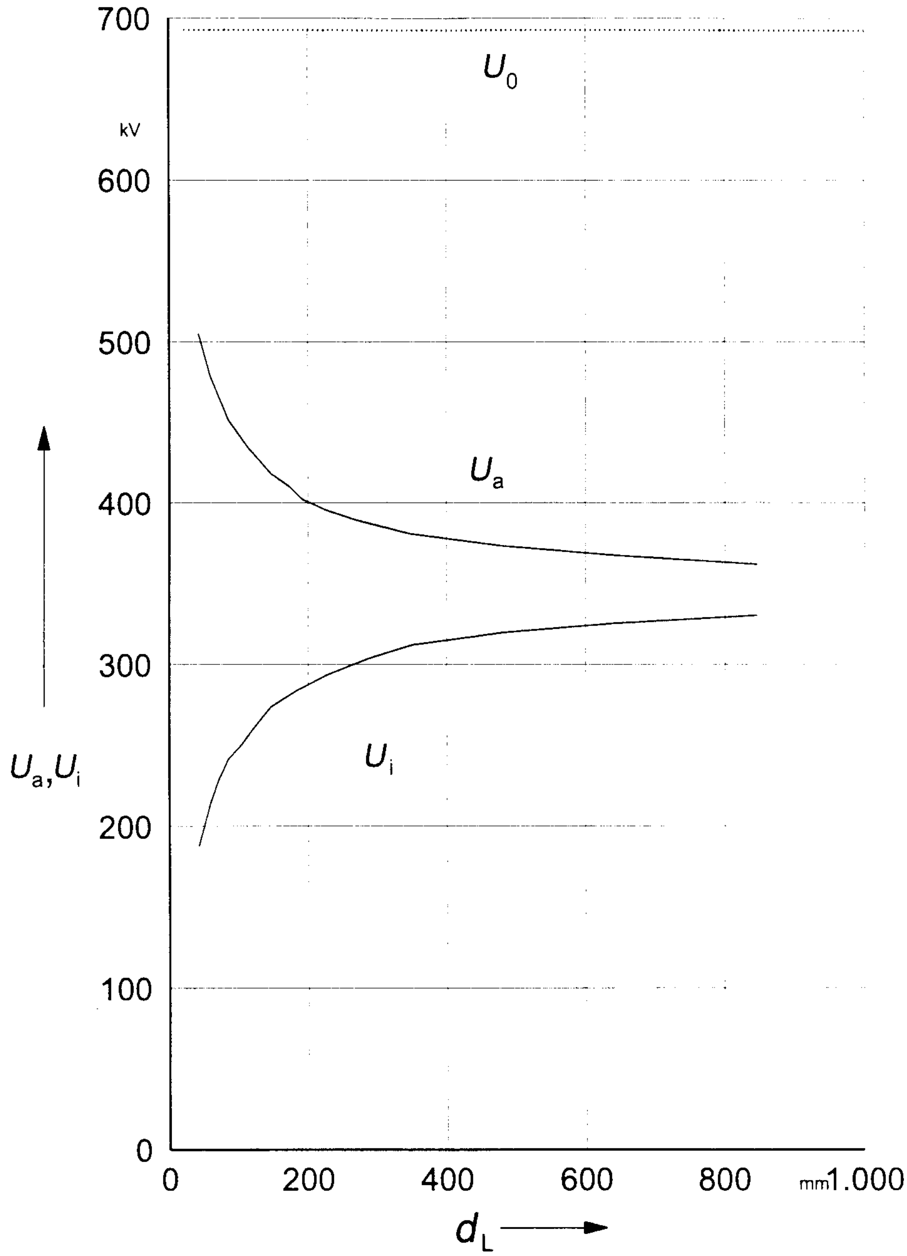
Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n = 400 kV E_{max} =3 kV/mm
U_0= 230,94 kV

Abb. 8b



Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_n = 750 kV E_{max} =4 kV/mm
U_0= 433,013 kV

Abb. 8c



Dicke der Steuerelektrode : 0 mm
U_h = 1200 kV E_{max} =5 kV/mm
U_0= 692,82 kV

Abb. 8d

Da aus Tabelle 3a hervorgeht, daß sich die Abmessungen der Anordnung für die gewählten Fixpunkte normieren lassen, ist dieses versuchsweise in Abbildung 9 auch für die kompletten Kurven ausgeführt worden. Durch das Zusammenfallen der

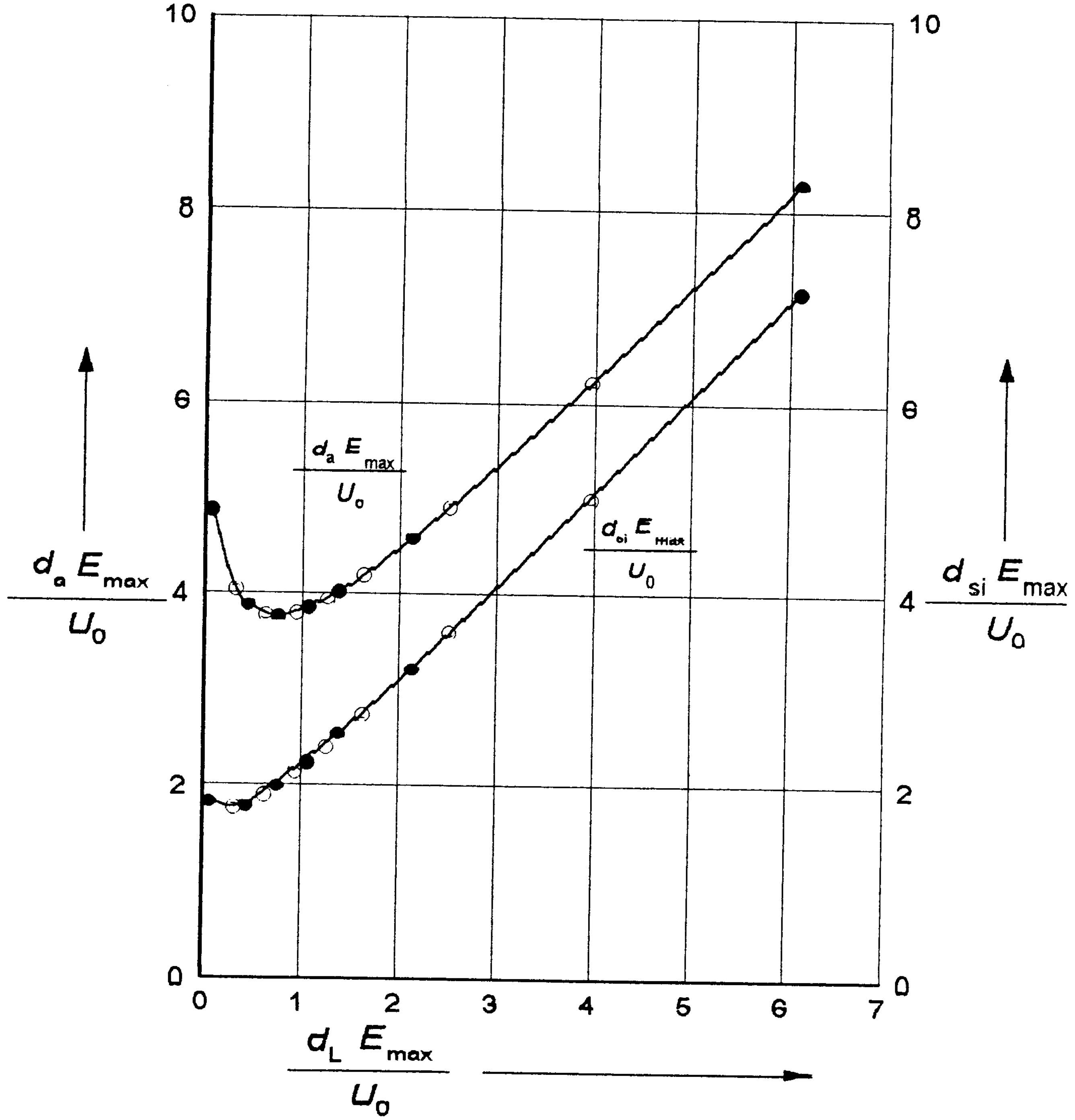


Abb.9 :Normierung von Steuerelektrode und Außenleiter.
Volle Punkte: Werte für U_0=63,5085 kV E_{max}=2 kV/mm
Leere Punkte: Werte für U_0=230,94 kV E_{max}=3 kV/mm
Dicke der Steuerelektr.: 0 mm

Kurven ist ersichtlich, daß die Normierung nach dem Quotienten E_{max}/U_0 für die komplette Kurve möglich ist.

6.3 Betrachtung von Grenzfällen

Da für einen unendlich großen Innenleiter die Krümmung der Elektrodenanordnung verschwindet, entsteht somit eine planparallele Anordnung. Damit wird aber auch der Verlauf von $E(d)$ konstant und eine Steuerelektrode kann keinen Einfluß mehr ausüben. Daher laufen bei sehr dicken Innenleitern die Kurven für d_a mit und ohne Steuerelektrode aufeinander zu, die Einsparungsmöglichkeiten nehmen ab. Technisch gesehen findet sich das Verhältnis kleiner Spannung bei großem Leiterdurchmesser bei Niederspannungen.

Für Innenleiter mit extrem geringen Durchmesser übernimmt letztlich die Steuerelektrode die Funktion des Innenleiters (elektrostatisch betrachtet). Somit läuft dann d_{Si} gegen den Idealwert d_L einer Anordnung ohne Steuerelektrode und d_a entspricht dem Idealwert einer Anordnung ohne Steuerelektrode. Da d_a bei Anordnungen ohne Steuerelektrode und verschwindendem Innenleiterdurchmesser gegen unendlich geht, werden hier die Einsparungsmöglichkeiten theoretisch unendlich groß. Unter technischen Gesichtspunkten sind diese Verhältnisse kaum sinnvoll.

7. Fehlerbetrachtung

Eine klassische Fehlerbetrachtung ist nicht durchführbar, weil weder Meßwerte, noch Vergleichswerte aus einem analytischen Rechenverfahren zur Verfügung stehen. Daher werden an dieser Stelle Überlegungen zur Fehlerberechnung getroffen, die im folgenden ausgeführt sind.

7.1 Vorüberlegungen

Die verwendeten Programme arbeiten im allgemeinen mit einer systematischen Variation der Elektrodengeometrie. Durch Aufsummierung der Schrittweiten kann ein systematischer Fehler bei der Berechnung der Elektrodengeometrie entstehen. Da jedoch genau mit diesen Werten die Feldstärke am Innenleiter und an der Steuerelektrode analytisch bestimmt werden, führt er lediglich zu einer Verzerrung des Variationsrasters in einer Größenordnung, die deutlich unter der üblicherweise verwendeten Rasterweite liegt.

Eine genaue Betrachtung der durch die numerische Berechnung erzeugten Fehler ist sehr aufwendig. Des weiteren muß berücksichtigt werden, daß die Kurve für d_a nicht nur von d_L abhängt, sondern auch von d_{si}.

Als Alternative werden hier für die nach E_{max}/U_0 normierten Kurven für d_{si} und d_a in Abhängigkeit von d_L Ausgleichspolynome bestimmt. Mit Hilfe dieser Ausgleichspolynome wird dann in Stichproben die Elektrodengeometrie bestimmt. Aus dieser Elektrodengeometrie wird dann jeweils die Feldstärke am Innenleiter $E(d_L)$ und an der Steuerelektrode $E(d_{si})$ analytisch berechnet.

Da E_{max} anfangs, bei Bestimmung der Ausgangswerte, festgelegt worden war, kann man dieses E_{max} als Referenzwerte für die neuen, über die Ausgleichspolynome bestimmten Werte für $E(d_L)$ und $E(d_{si})$ verwenden.

Es wird dann der relative Fehler F_i für den Innenbereich und F_a für den Außenbereich der Stichproben bestimmt. Weiter werden die Mittelwerte der relativen Fehler $\bar{F}_i$ und $\bar{F}_a$ und die Standardabweichungen σ_i und σ_a bestimmt. Auf diese Weise soll eine pauschale Fehlerabschätzung gefunden werden, die wegen des fehlerbehafteten Ausgleichspolynomes einen größeren

Fehler ergibt, als die Bestimmung der Elektrodengeometrie durch systematische Variation.

7.2 Berechnung der Ausgleichspolynome

Um die für eine Fehlerrechnung benötigten Ausgleichspolynome zu berechnen, werden für diskrete Werte des normierten Leiterdurchmessers die diesen entsprechenden Leiterdurchmesser für U_n=400 kV und E_{max}=3 kV berechnet. Mit einem Programm, das für feste Leiterdurchmesser durch systematisches Variieren des Steuerelektrodendurchmessers und Außenleiterinnendurchmessers die optimale Anordnung sucht, werden der kleinste Außendurchmesser und die dazu gehörende optimale Position der Steuerelektrode bestimmt. Die Dicke der Steuerelektrode wird hierbei zu 0 mm idealisiert. Die so gewonnenen Werte werden wiederum mit dem Verhältnis E_{max}/U_0 normiert.

Nr.:	$d_L \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	$d_{si} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	$d_a \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	d_L	d_{si}	d_a
				mm	mm	mm
1	0,1	1,811	4,657	7,698	139,4	358,5
2	0,3	1,768	4,056	23,094	136,08	312,2
3	0,4	1,799	3,914	30,792	138,455	301,33
4	0,5	1,847	3,828	38,49	142,155	294,77
5	0,6	1,906	3,783	46,188	146,74	291,21
6	0,763	2	3,763	56,67	153,99	289,67
7	0,8	2,048	3,767	61,584	157,65	289,98
8	0,9	2,126	3,785	69,282	163,68	291,38
9	1	2,208	3,816	76,98	169,97	293,74
10	1,2	2,379	3,905	92,376	183,12	300,58
11	1,5	2,648	4,084	115,47	203,82	314,41
12	2	3,149	4,454	153,96	242,4	342,9
13	2,5	3,593	4,871	192,45	276,605	374,96

Tabelle: 4 (U_n=400 kV, U_0=230,94 kV, E_{max}=3 kV/mm)

Die Auswahl der diskreten Werte des normierten Leiterdurchmessers ist im wesentlichen willkürlich, jedoch wurde darauf geachtet, interessierende Bereiche zu überdecken und die Werte im Krümmungsbereich der Kurven besonders dicht zu setzen. Ferner wird das Minimum der Kurven für d_a mit und ohne Steuerelektrode berücksichtigt.

Die Ergebnisse werden in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Die Zeile 4 entspricht dem Optimum einer Anordnung mit Steuerelektrode. Zeile 12 entspricht dem Optimum einer ungesteuerten Anordnung.

Als Ausgleichspolynome werden Polynome dritten Grades gewählt, die einen Kompromiß zwischen Darstellungsgenauigkeit und Rechenaufwand darstellen. Ihre Berechnung erfolgt nach [4] und [5]. Als Ergebnis kann angegeben werden:

$$\left(\frac{d_{si}\cdot E_{max}}{U_0}\right) = a + b\cdot\left(\frac{d_L\cdot E_{max}}{U_0}\right) + c\left(\frac{d_L\cdot E_{max}}{U_0}\right)^2 + d\left(\frac{d_L\cdot E_{max}}{U_0}\right)^3 \qquad (13.1)$$

$$\left(\frac{d_a\cdot E_{max}}{U_0}\right) = e + f\cdot\left(\frac{d_L\cdot E_{max}}{U_0}\right) + g\left(\frac{d_L\cdot E_{max}}{U_0}\right)^2 + h\left(\frac{d_L\cdot E_{max}}{U_0}\right)^3 \qquad (13.2)$$

mit den Werten für die Koeffizienten:

a	1,787	e	4,794
b	-0,1742	f	-2,797
c	0,7258	g	2,187
d	-0,1473	h	-0,4246

Tabelle: 5 (Koeffizienten der Ausgleichspolynome)

Der Geltungsbereich des Ausgleichspolynoms geht von einem normierten Innenleiterdurchmesser von 0,1 bis zu einem von 2,5.

7.3 Stichproben

An acht Stellen des mit E_{max}/U_0 normierten Leiterdurchmessers werden mit Hilfe der Ausgleichspolynome die normierten Steuerelektrodendurchmesser und Außenleiterinnendurchmesser bestimmt. Diese werden mit den gleichen Werten

von U_0 und E_{max} wie sie bei der Gewinnung des Ausgleichspolynoms verwendet wurden, in die Werte von d_L d_{si} und d_a umgerechnet.

Zusammen mit U_0 dienen sie der Bestimmung von $E(d_L)$und $E(d_{si})$. Aus $E(d_L)$und $E(d_{si})$ sowie E_{max} werden die relativen Fehler F_{Ei} und F_{Ea} der Maximalfeldstärke im Innen- und im Außenbereich nach [5] errechnet. Die Formeln für F_{Ei} und F_{Ea} lauten:

$$F_{Ei} = \frac{|E(d_L) - E_{max}|}{E_{max}} \cdot 100\% \tag{14.1}$$

$$F_{Ea} = \frac{|E(d_{si}) - E_{max}|}{E_{max}} \cdot 100\% \tag{14.2}$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 eingetragen.

$d_L \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	$d_{si} \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	$d_a \cdot \frac{E_{max}}{U_0}$	$E(d_L)$	$\frac{\lvert E(d_L) - E_{max}\rvert}{E_{max}} \cdot 100\%$	$E(d_{si})$	$\frac{\lvert E(d_{si}) - E_{max}\rvert}{E_{max}} \cdot 100\%$
			kV/mm	%	kV/mm	%
0,1	1,7767	4,5357	3,0723	2,41	3,0724	2,4133
0,15	1,7767	4,4222	3,0136	0,45	3,0135	0,45
0,55	1,8863	3,8466	2,968	1,0667	2,967	1,1
0,763	2,0113	3,6091	3,1317	4,39	3,1317	4,39
1,05	2,2341	3,7768	3,052	1,7333	3,052	1,7333
2	3,1658	4,5512	2,901	3,3	2,901	3,3
2,05	3,2136	4,593	2,9	3,3333	2,9	3,3333
2,5	3,5909	4,8359	3,0386	3,0386	3,0386	3,0386

Tabelle: 6 (U_n=400 kV, U_0=230,94 kV, E_{max}=3 kV/mm, Dicke(Si)=0 mm)

Die arithmetische Mittelwerte $\overline{F_{Ei}}$ und $\overline{F_{Ea}}$ der relativen Fehler der Maximalfeldstärken sind:

$$\overline{F_{Ei}} = 2{,}24625\ \%$$

und

$$\overline{F_{Ea}} = 2{,}2508\ \%.$$

Nach [6] werden die Standartabweichungen σ_{Ei} und σ_{Ea} der relativen Fehler der Maximalfeldstärken bestimmt. Ihre Bestimmungsgleichungen lauten:

$$\sigma_{Ei} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{1}^{n} \left(F_{Ein} - \overline{F_{Ei}}\right)^2} \tag{15.1}$$

$$\sigma_{Ea} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{1}^{n} \left(F_{Ean} - \overline{F_{Ea}}\right)^2} \tag{15.2}$$

Daraus und aus Tabelle 6 ergeben sich für σ_{Ei} und σ_{Ea} folgende Werte für die Standardabweichung:

$$\sigma_{Ei} = 1{,}3478\ \%$$

und

$$\sigma_{Ea} = 1{,}34375\ \%.$$

8. Einfluß der Steuerelektrodendicke

Die Betrachtungen in Kapitel 7 gelten im Prinzip nur für Anordnungen mit ideal dünner Steuerelektrode. Daher soll hier exemplarisch der Einfluß der Steuerelektrodendicke untersucht werden. Dazu wird bei einer potentialgesteuerten Anordnung, die für $U_n = 400\,\text{kV}$ entsprechend $U_0 = 230{,}94\,\text{kV}$ und eine Betriebsfeldstärke von $E_{max} = 3\,\text{kV/mm}$ optimiert ist, der Steuerelektrodeninnendurchmesser mit unterschiedlichen Dicken s_{si} der Steuerelektrode variiert und dazu der geringstmögliche Außenleiterinnendurchmesser gesucht. Für einige diskrete Werte von d_{si} sind die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefaßt.

d_{si}	d_a bei $s_{si} = 0$ mm	d_a bei $s_{si} = 1$ mm	d_a bei $s_{si} = 5$ mm	d_a bei $s_{si} = 10$ mm
mm	mm	mm	mm	mm
100	337	333,75	332	331,25
115	309	307,5	310,5	314
130	295,75	295,25	300,25	306
140	291,5	291,5	297,5	304,25
145	290,5	290,5	297	304
150	290	290	296,75	304
155	289,75	290	297	304,75
160	290,25	290,5	297,75	305,5
170	291,75	292,25	299,75	308
180	294,5	295,25	303	311,5
190	298,25	299	307	315,5
199,75	302,5	303,25	311,25	320

Tabelle 7:($U_0 = 230{,}94\,\text{kV}$, $E_{max} = 3\ \text{kV/mm}$,$d_L = 56{,}67$ mm)

s_{si}	d_{si}	d_a
mm	mm	mm
0	153,5	289,75
1	152,125	290
5	148,375	296,75
10	145	304

Tabelle 8:($U_0 = 230{,}94\,\text{kV}$, $E_{max} = 3\ \text{kV/mm}$,$d_L = 56{,}67$ mm)

Die Minimumwerte der Kurven stehen in Tabelle 8. Die von Tabelle 3a etwas abweichenden Werte für $s_{si} = 0$ mm sind aus einem gröberen Rastermaß der Untersuchung zu erklären.

Um einen besseren Überblick über die Abweichungen zu bekommen, wird die Differenz zwischen dem Innendurchmesser des Außenleiters bei nicht verschwindender Steuerelektrodendicke und dem Innendurchmesser des Außenleiters bei zu einer Dicke von 0 mm idealisierter Steuerelektrode als relativer Fehler F_{ad} in Bezug auf den Außenleiterinnendurchmesser bei idealisierter Steuerelektrode ausgedrückt. Zusätzlich wird aus diesen Werten auch noch das arithmetische Mittel $\overline{F_{ad}}$ und die Standardabweichung σ_{ad} bestimmt. Die verwendeten Formeln lauten nach [5] und [6]:

$$F_{ad} = \frac{\left| d_a(s_{si}) - d_a(s_{si} = 0) \right|}{d_a(s_{si} = 0)} \cdot 100\% \qquad (16)$$

$$\sigma_{ad} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{1}^{n} \left(F_{ad} - \overline{F_{ad}} \right)^2} \qquad (17)$$

Tabelle 9 enthält die relativen Fehler, die durch die Dicke der Steuerelektrode entstehen, in Bezug auf eine ideal dünne Steuerelektrode.

	$s_{si} = 1$ mm	$s_{si} = 5$ mm	$s_{si} = 10$ mm
d_{si}	F_{ad}	F_{ad}	F_{ad}
mm	%	%	%
100	0.96	1,48	1,7
115	0,48	0,48	1,6
130	0,17	1,52	3,46
140	0	2,06	4,37
145	0	2,24	4,65
150	0	2,33	4,83
155	0,9	2,5	5,18
160	0,9	2,58	5,25
170	0.15	2,74	5,57
180	0,25	2,89	5,77
190	0.25	2,93	5,78
199,75	0,25	2,89	5,78

Tabelle 9: ($U_0 = 230{,}94$ kV, $E_{max} = 3$ kV / mm , $d_L = 56{,}67$ mm)

Der arithmetische Mittelwert der relativen Fehler beträgt 0,226 % für eine 1 mm dicke Steuerelektrode. Die Standardabweichung beträgt dabei 0,27 %. Die Dicke der Steuerelektrode von 1 mm entspricht 1,76 % des Innenleiterdurchmessers.

Für eine 5 mm dicke Steuerelektrode, entsprechend 8,8 % des Innenleiterdurchmessers, beträgt der arithmetische Mittelwert der relativen Fehler 2,22 %. Die Standardabweichung beträgt dabei 0,74 %.

Beträgt die Dicke der Steuerelektrode 17,65 % des Innenleiterdurchmessers, was eine Dicke von 10 mm bedeutet, so beträgt der arithmetische Mittelwert des relativen Fehlers 4,49 %. Hierbei beträgt die Standardabweichung 1,49 %

Der durch die Dicke der Steuerelektrode verursachte Fehler ist also bei technisch interessierenden Dicken relativ gering. Allgemein gesehen führt die Dicke der Steuerelektrode bei Innendurchmessern der Steuerelektrode, die unter dem Optimum liegen, sogar zu einer Verringerung des minimal möglichen Außenleiterinnendurchmessers. Im Bereich des Optimums des Steuerelektrode und darüber hinaus führt sie zu einer Vergrößerung des minimal möglichen Außenleiterinnendurchmessers. Diese Vergrößerung liegt im untersuchten Bereich (Dicke s_{si} zwischen 1,76 % und 17,65 % des Innenleiterdurchmessers) unter dem doppelten der Steuerelektrodendicke.

9. Beispiele

9.1 500 kV Rohrleitersystem

9.1.1 Vorgaben für 500 kV Rohrleitersystem

In [9] und [10] sind Daten zu 500 kV Rohrleitersystemen zu finden. Es existieren zwei voneinander abweichende Systeme, die sich in der Konstruktion der Isolatoren und in den Außenabmessungen unterscheiden. Daher wurden für eine Beispielkonstruktion aus diesen Angaben Mittelwerte berechnet. Die Unterschiede in den Isolatoren sind für diese Untersuchung nicht relevant.

Das erste System besitzt einen Innenleiterdurchmesser von 230 mm bei einer Leiterwandstärke von 20 mm und einen Außendurchmesser von 815 mm bei einer Wandstärke von 10 mm.

Das zweite System besitzt ebenfalls einen Innenleiterdurchmesser von 230 mm und eine Leiterwandstärke von 20 mm. Abweichend jedoch einen Außendurchmesser von 711 mm mit einer 8 mm dicken Wandung.

Da die Innenleiter identisch sind, werden sie unverändert übernommen. Aus den Angaben über die Außenleiter werden die Außenleiterinnendurchmesser berechnet, und daraus deren arithmetische Mittelwerte. Auch aus den Wandstärken werden die arithmetischen Mittelwerte gewonnen.

Daraus ergibt sich folgende Vergleichsanordnung:

Innenleiteraußendurchmesser $d_L = 230$ mm
Innenleiterwandstärke $s_L = 20$ mm
Außenleiterinnendurchmesser $d_a = 749$ mm
Außenleiterwandstärke $s_a = 9$ mm
Außenleiteraußendurchmesser $d_{aa} = 767$ mm

Die Systeme sind für eine Nennspannung von 500 kV vorgesehen, entsprechend einer Leiterspannung $U_0 = U_n/\sqrt{3}$ von 288,67 kV. Getestet wurden sie für eine im Fehlerfall dauernd anstehende Überspannung von 420 kV Leiter gegen Erde. Aus U_0 und den gemittelten Werten für die

Abmessungen wird mit Gleichung (1) eine effektive maximale Betriebsfeldstärke E_{max} am Innenleiter von 2,13 kV/mm bestimmt.

Ein für diese Leiterspannung und diese Feldstärke am Innenleiter optimierte ungesteuerte Anordnung hätte nach den Gleichungen (3.1; 3.2) einen Innenleiterdurchmesser d_{L22} von 271,05 mm und einen Außenleiterinnendurchmesser d_{a22} von 736,79 mm. Die gemittelten Werte sind diesem relativ ähnlich.

Über die Stoßspannungsprüfung liegen keine Angaben vor. Daraus, daß die Anordnung mit 420 kV Leiterspannung getestet wurde, läßt sich auf eine höchstzulässige Spannung zwischen den Leitern von 727 kV schließen. Wählt man nach [11] und [12] die dazu passende Schaltstoßspannung von 1550 kV und die Blitzstoßspannung 1950 kV, so liegt man mit nach Gleichung (1) berechneten Spitzenfeldstärken am Innenleiter für die Schaltstoßspannung von 11,41 kV/mm und 14,36 kV/mm für die Blitzstoßspannung im Bereich der literaturüblichen Werte [7].

Der Querschnitt A_L des aus Aluminium gefertigten Innenleiters beträgt 13195 mm^2. Der Querschnitt A_a des ebenfalls aus Aluminium hergestellten Außenleiters beträgt 21432 mm^2. Setzt man die Dichte ρ_{AL} des Aluminiums zu 0,0027 g/mm^3 [13], so ergibt sich damit für den Innenleiter ein Gewicht von 35,63 kg/m und für den Außenleiter ein Gewicht von 57,87 kg/m. Das Gesamtgewicht der Anordnung beträgt somit 93,87 kg/m ohne Berücksichtigung der Stützer, der Gasfüllung und der zur Montage benötigten Kleinteile.

Nach [3] beträgt die Kapazität einer koaxialen Anordnung :

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{d_a}{d_L}\right)} \qquad (18)$$

Mit $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ As/Vm$ und der Länge der Anordnung l. Die relative Dielektrizitätskonstante ε_r ist bei SF_6 mit sehr guter Näherung 1. Durch Division mit l erzeugt man damit die Gleichung für den Kapazitätsbelag:

$$C' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{d_a}{d_L}\right)} \qquad (19)$$

Damit errechnet sich der Kapazitätsbelag der Anordnung zu 47,1 pF/m.

9.1.2 Optimiertes potentialgesteuertes 500 kV Rohrleitersystem

Um einen sinnvollen Vergleich zu bekommen, werden die Werte für U_0=288,67 kV und E_{max}=2,31 kV/mm aus 9.1.1 übernommen. Ferner wird der Wert für die Wanddicke des Außenleiters s_a=9 mm übernommen, da davon ausgegangen wird, daß der Druck des Isoliergases im Innenleiter im optimierten System identisch ist.

Die Dicke s_{si} der Steuerelektrode wird ebenfalls zu 9 mm angenommen. Die Gleichsetzung mit der Wanddicke des Außenleiters dient einer Abschätzung nach oben. Da sie keinen Gasdruck aushalten muß, könnte sie auch dünner ausgeführt werden. Die Wanddicke des Innenleiters wird zu 15 mm gesetzt.

Mit den Gleichungen (12.1;12.2;12.3) werden die optimalen Abmessungen für eine Anordnung mit ideal dünner Steuerelektrode bestimmt. Diese dienen zur Abschätzung der Parametergrenzen bei der Bearbeitung durch das auch in Kapitel 5 verwendete FORTRAN-Programm.

Die so bestimmten Abmessungen lauten:

Innenleiteraußendurchmesser $d_L = 100$ mm,
Steuerelektrodeninnendurchmesser $d_{si} = 263{,}13$ mm,
Außenleiterinnendurchmesser $d_a = 522{,}75$ mm.

Mit den festgelegten Wandstärken:
Innenleiterwandstärke $s_L = 15$ mm,
Steuerelektrodendicke $s_{si} = 9$ mm,
Außenleiterwandstärke $s_a = 9$ mm,

lassen sich daraus die folgenden Größen errechnen:

Steuerelektrodenaußendurchmesser $d_{sa} = 281{,}13$ mm
Außenleiteraußendurchmesser $d_{aa} = 540{,}75$ mm.

Mit den Gleichungen (10;11.1;11.2) werden die Spannungen U_i zwischen Steuerelektrode und Innenleiter, und U_a zwischen Außenleiter und Steuerelektrode bestimmt. Zur Kontrolle kann man nun mit den Gleichungen (4.1;4.2;5) die maximalen Feldstärken und die Leiterspannung bestimmen. Es müssen die Eingangswerte herauskommen.

Auf diese Weise wird U_i zu 103,01 kV und U_a zu 185,66 kV bestimmt.

Setzt man in Gleichung (19) für d_a und d_L die entsprechenden Werte d_{si} und d_L, bzw. d_a und d_{sa} ein, so erhält man die Kapazitätsbeläge zwischen Steuerelektrode und Innenleiter, C_i' sowie zwischen Außenleiter und Steuerelektrode, C_a'.

Diese betragen 57,5 pF/m für C_i' und 90 pF/m für C_a'.

Daraus läßt sich der Gesamtkapazitätsbelag C_g' der Anordnung bestimmen, indem man die Reihenschaltung der Teilkapazitäten als Gesamtkapazität der Anordnung ansieht. Es folgt daraus:

$$C_g' = \frac{1}{\frac{1}{C_i'} + \frac{1}{C_a'}} \qquad (20)$$

In der hier betrachteten Anordnung ergibt sich für C_g' ein Wert von 35,1 pF/m.

Aus den geometrischen Abmessungen ergibt sich eine Querschnittsfläche des Innenleiters A_L von 4005 mm^2. Die Querschnittsfläche der Steuerelektrode A_S ergibt sich zu 7694 mm^2, und die des Außenleiters A_a zu 15035 mm^2.

Zum Energietransport über eine Leitung ist eine Leiterlängsspannung unbedingt notwendig. Diese schlägt sich in voneinander differierenden Leiterspannungen am Anfang und Ende der Leitung nieder. Da über die Gleichungen (11.1;11.2) die Teilspannungen U_i und U_a proportional mit der Leiterspannung verknüpft sind, wird auch die Steuerelektrode eine Längspannung aufweisen. Diese führt zu einem Längsstrom in der Steuerelektrode. Damit ist dann auch ein

Energietransport und leider auch Verluste verbunden. Zur Unterdrückung des Steuerelektrodenlängsstromes kann man die Steuerelektrode aus einem Material mit großem elektrischem Widerstand fertigen, zum Beispiel einem leitfähig gemachten Kunststoff. Dies hätte auch eine Gewichtsreduzierung und eine Unterdrückung von Wirbelströmen zu Folge. Eine Stromreduzierung in der Steuerelektrode bewirkt auch eine Verringerung der magnetischen Kraftwirkung auf die Steuerelektrode.

Im folgenden sind daher bei der Gewichtsbestimmung für die Steuerelektrode zwei Alternativen ausgeführt. Eine mit einer Steuerelektrode aus Aluminium und eine mit einer aus Kunststoff. Es wurden die Dichten $\rho_{aL} = 0{,}0027\ \mathrm{g/mm^3}$ für Aluminium und $\rho_{EP} = 0{,}00125\ \mathrm{g/mm^3}$ für Kunststoff verwendet [13]. Der Wert ρ_{EP} ist ein Mittelwert für Epoxid.

Damit besitzt diese optimierte Anordnung einen Innenleiter mit einem Gewicht von 10,8 kg/m, einen Außenleiter mit einem Gewicht von 40,59 kg/m und eine Steuerelektrode, die in der Aluminiumausführung 20,77 kg/m und in der Kunststoffausführung 9,62 kg/m wiegt.

Das Gesamtgewicht ohne Stützer, Gasfüllung und Montagematerial beträgt bei einer Aluminiumsteuerelektrode 72,16 kg/m und bei einer Kunststoffsteuerelektrode 61,01 kg/m.

Beaufschlagt man eine solche potentialgesteuerte Anordnung mit einer Stoßspannung U_S, so wird sich die Aufteilung der Teilstoßspannungen U_{is} und U_{as} im Innen- und Außenbereich wegen des steilen Anstiegs der Stoßspannung nicht nach der äußeren Beschaltung richten, sondern nach dem kapazitiven Spannungsteiler aus den Kapazitäten zwischen Innenleiter und Steuerelektrode sowie zwischen Außenleiter und Steuerelektrode. Man kann an dieser Stelle auch mit den Kapazitätsbelägen rechnen, da sich die Länge l herauskürzt. Es folgt somit:

$$U_{is} = U_s \cdot \frac{C_a'}{C_a' + C_i'} \tag{21.1}$$

$$U_{as} = U_s \cdot \frac{C_i'}{C_a' + C_i'} \tag{21.2}$$

Setzt man die so erhalten Werte für die Stoßspannungen U_{is} und U_{as} in die Gleichungen (4.1;4.2) ein, so erhält man die Spitzenwerte der Feldstärken bei Stoßpannungsbeanspruchung am Innenleiter E_{maxsi} und an der Steuer-elektrode E_{maxsa}. Daraus folgen die Gleichungen:

$$E_{maxsi} = \frac{U_{is}}{\ln\left(\frac{d_{si}}{d_L}\right)} \cdot \frac{2}{d_L} \tag{22.1}$$

$$E_{maxsa} = \frac{U_{as}}{\ln\left(\frac{d_a}{d_{sa}}\right)} \cdot \frac{2}{d_{sa}} \tag{22.2}$$

Übernimmt man die Werte der Vorgabe für Schalt- und Blitzstoßspannungs-prüfung, so folgt daraus für die Prüfung mit einer Schaltstoßspannung von 1550 kV:

U_{is}=945,81 kV U_{as}=604,19 kV
E_{maxsi}=19,6 kV/mm E_{maxsa}=6,92 kV/mm

Bei der Blitzstoßspannungsprüfung (1950 kV) errechnet man :

U_{is}=1189,89 kV U_{as}=760,11 kV
E_{maxsi}=24,6 kV/mm E_{maxsa}=8,71 kV/mm

Während die zulässigen Werte im Außenbereich nicht erreicht werden, werden sie im Innenbereich deutlich überschritten. Die Potentialsteuerung ist in dieser Form für Stoßspannungsbeanspruchungen unwirksam.

9.1.3 Potentialgesteuertes 500 kV Rohrleitersystem mit großem Leiterquerschnitt.

Die optimierte Anordnung aus dem Kapitel 9.1.2 weist einen geringeren Innenleiterquerschnitt auf, als die Vorgabeanordnung. Daher wird an dieser Stelle eine Anordnung untersucht, die den Innenleiter aus der Vorgabe übernimmt.

Wie in Kapitel 9.1.2 wird für die Außenleiterwandstärke s_a und die Wandstärke der Steuerelektrode s_{si} 9 mm gewählt.

Aus dem Innenleiterdurchmesser d_L von 230 mm und den übernommenen Werten von U_0 und E_{max} errechnet man den normierten Wert $d_L \cdot E_{max} / U_0$. Aus Abbildung 9 oder mit den Gleichungen (13.1;13.2) mit den in Kapitel 7 angegebenen Koeffizienten gewinnt man die dazugehörigen normierten Werte $d_{si} \cdot E_{max} / U_0$ und $d_a \cdot E_{max} / U_0$. Diese dienen zur Abschätzung der Parametergrenzen bei der Bearbeitung durch das auch in Kapitel 5 verwendete FORTRAN-Programm.

Der Programmdurchlauf ergibt:

Innenleiteraußendurchmesser $d_L = 230$ mm,
Steuerelektrodeninnendurchmesser $d_{si} = 379{,}125$ mm,
Außenleiterinnendurchmesser $d_a = 588{,}5$ mm.

Mit den festgelegten Wandstärken:
Innenleiterwandstärke $s_L = 20$ mm,
Steuerelektrodendicke $s_{si} = 9$ mm,
Außenleiterwandstärke $s_a = 9$ mm,

Es lassen sich daraus die folgenden Größen errechnen:

Steuerelektrodenaußendurchmesser $d_{sa} = 397{,}125$ mm
Außenleiteraußendurchmesser $d_{aa} = 606{,}5$ mm.

Die weitere Berechnung erfolgt analog Kapitel 9.1.2. Es ergeben sich folgende Werte:

U_a=166,29 kV U_i=122,38 kV
C'_a=141,44 pF/m C'_i=111,3 pF/m
C'_g=62,29 pF/m

Für die Querschnittsflächen erhält man:

A_L=13195 mm^2 A_S=10974 mm^2
A_a=16894 mm^2

Daraus errechnen sich die Gewichte für den Innenleiter von 35,6 kg/m. Der Außenleiter wiegt 45,6 kg/m. Die Steuerelektrode wiegt in der Aluminiumausführung 29,6 kg/m und in der Kunststoffausführung 13,7 kg/m. Dies entspricht einem Gesamtgewicht der Anordnung ohne Stützer, Gasfüllung und Montagematerial von 110,8 kg/m für eine Aluminiumsteuerelektrode und von 94,9 kg/m für eine Kunststoffsteuerelektrode.

Für die Schaltstoßspannungsbeanspruchung (1550 kV) erhält man:

U_{is}=867,38 kV U_{as}=682,62 kV
E_{maxsi}=15,09 kV/mm E_{maxsa}=8,75 kV/mm

Bei der Blitzstoßspannungsprüfung (1950 kV) errechnet man :

U_{is}=1007,28 kV U_{as}=792,72 kV
E_{maxsi}=17,52 kV/mm E_{maxsa}=10,15 kV/mm

Während die zulässigen Werte im Außenbereich nicht erreicht werden, werden sie im Innenbereich überschritten.

9.1.4 Vergleich der 500 kV Rohrleitersysteme

Es werden hier die Verminderungen oder Vergrößerungen der durchgerechneten potentialgesteuerten Versionen in Bezug auf die Vorgabe verglichen. Gegenstand der Vergleichsbetrachtung ist der Außendurchmesser, der Kapazitätsbelag, und das Gesamtgewicht einer Ausführung mit Aluminiumsteuerelektrode, sowie einer Ausführung mit Kunststoffsteuerelektrode.
Insbesondere, wenn von einer aus Kunststoff gefertigten Steuerelektrode ausgegangen wird, ermöglicht eine Potentialsteuerung eine deutliche Durchmesser- und auch Gewichtsreduzierung von Rohrleitern. Diese Reduzierung ist aber nur dann voll auszuschöpfen, wenn die mögliche Außendurchmesserverminderung des Innenleiters durchgeführt wird. Wird der Innenleiteraußendurchmesser beibehalten, ergibt sich lediglich eine Durchmesserverminderung. Das Gewicht der Anordnung kann sogar noch steigen. Probleme bereitet die Stoßspannungsbeanspruchung, es muß mit geeigneten Stoßspannungsableitern auf eine Unterdrückung der unzulässig hohen Spitzen hingearbeitet werden.

		Vorgabe (gemittelt)	Optimiertes System	System mit großem Leiterquer.
d_{aa}	mm	767	540,75	606,5
d_{aa} bezogen auf Vorgabe	%	100	70,5	79,1
Gesamtgewicht	kg/m	93,5	–	–
Gesamtgewicht (Alusteuerel.)	kg/m	–	72,16	110,8
Gesamtgewicht (Alusteuerel.) bezogen auf Vorgabe	%	–	77,2	118,5
Gesamtgewicht (Kunststoff-steuerel.)	kg/m	–	61,01	94,9
Gesamtgewicht (Kunststoff-steuerel.) bezogen auf Vorgabe	%	–	65,25	101,5
$C_g^{\prime}$	pF/m	47,1	35,1	62,29
$C_g^{\prime}$ bezogen auf Vorgabe	%	100	74,5	132,2

Tabelle 10: Vergleich verschiedener gesteuerter Anordnungen mit einer ungesteuerten.

Aufgrund der beschränkten Zeit konnte eine Potentialsteuerung in einer dreiphasigen Anordnung leider nicht untersucht werden. Ein Vergleich zwischen einer ungesteuerten dreiphasigen Anordnung und drei einphasigen gesteuerten Anordnungen ist aber trotzdem möglich.

In [9] und [10] fanden sich auch Angaben zu dreiphasigen 500 kV Rohrleitersystemen aus Aluminium. Es wurden zwei Systeme beschrieben, die jeweils drei Leiter mit einem Außendurchmesser von 230 mm und Wandstärken

von 20 mm aufweisen. Dies entspricht auch der oben angegebenen ungesteuerten einphasigen Anordnung. Das Hüllrohr des einen Systems hat einen Außendurchmesser von 2180 mm und eine Wandstärke von 15 mm. Daraus läßt sich ein Gesamtgewicht der Anordnung ohne Stützer etc. von 381,35 kg/m errechnen. Das andere System hat einen Hüllrohr-außendurchmesser von 1200 mm bei einer Wandstärke von 12 mm. Aus diesen Angaben läßt sich ein Gesamtgewicht ohne Stützer, Gasfüllung und Montagematerial zu 227,89 kg/m bestimmen. Auf letzteres soll sich der Vergleich beziehen.

Drei optimierte potentialgesteuerte Systeme nach Kapitel 9.1.2 wiegen in der Ausführung mit Kunststoffsteuerelektrode zusammen 183,03 kg/m entsprechend 80 % des dreiphasigen Systems.

Drei potentialgesteuerte Systeme mit großem Leiterdurchmesser nach Kapitel 9.1.3 wiegen in der Ausführung mit Kunststoffsteuerelektrode zusammen 284,7 kg/m entsprechend 125 % des dreiphasigen System.

Einem einzelnen Rohr mit 1200 mm Außendurchmesser stehen dabei drei Rohre mit 540,75 mm bzw. 606,5 mm Außendurchmesser gegenüber. Diese Aufteilung kann unter Umständen günstig sein, wenn man daß System zum Beispiel in einem engen Tunnel verlegt. Durch die größere Oberfläche ist eine bessere Kühlungsmöglichkeit gegeben. Auch hat man eine Möglichkeit, durch Auskreuzen und Vergrößern des Achsabstandes der Rohrleiter die Mantel- und Wirbelstromverlußte zu verringern [14].

9.2 1200 kV Rohrleitersystem

In [8] wurden Angaben zu einem 1200 kV Rohrleitersystem gefunden. Es besteht aus einem Aluminiuminnenleiter von 280 mm Außendurchmesser und einer Wandstärke von 13 mm. Der Aluminiumaußenleiter hat einen Außendurchmesser von 760 mm bei einer Wandstärke von 7,6 mm.

Ausgelegt ist es für eine Nennspannung von 1100 kV. Die maximale Spannung beträgt 1200 kV. Es ist für eine Blitzstoßspannung von 2175 kV und eine Schaltstoßspannung von 1800 kV gebaut. Der Nennstrom beträgt 5000 A und die Übertragungsleistung 10000 MVA.

Die maximale Betriebsfeldstärke beträgt 5 kV/mm effektiv und die Spitzenfeldstärke bei Schaltstoßspannungsbeanspruchung beträgt 13 kV/mm. Bei Blitzstoßspannungsbeanspruchung beträgt die Spitzenfeldstärke 15,8 kV

Aus diesen Angaben läßt sich ein Innenleiterquerschnitt A_L von 10904 mm^2 und ein Außenleiterquerschnitt A_a von 17964 mm^2 bestimmen. Das Gesamtgewicht der Anordnung beträgt somit 77,94 kg/m. Der Kapazitätsbelag beträgt 54,4 pF/m. In einem Verfahren wie in Kapitel 9.1.2 wird eine optimale potentialgesteuerte Anordnung bestimmt. Dabei wird die Wandstärke des Innenleiters von 13 mm beibehalten. Ebenso wird die Wandstärke des Außenleiters mit 7,6 mm übernommen. Auch die Dicke der Steuerelektrode wird gleich der Außenleiterwandstärke gesetzt.

Das Ergebnis ist eine Anordnung mit folgenden Abmessungen:

Innenleiteraußendurchmesser $d_L = 102$ mm,
Steuerelektrodeninnendurchmesser $d_{si} = 270{,}625$ mm,
Außenleiterinnendurchmesser $d_a = 532{,}25$ mm.

Mit den festgelegten Wandstärken:
Innenleiterwandstärke $s_L = 13$ mm,
Steuerelektrodendicke $s_{si} = 7{,}6$ mm,
Außenleiterwandstärke $s_a = 7{,}6$ mm,

lassen sich daraus die folgenden Größen errechnen:

Steuerelektrodenaußendurchmesser $d_{sa} = 285{,}825$ mm
Außenleiteraußendurchmesser $d_{aa} = 547{,}45$ mm.

Weiter folgt:

U_i=248,72 kV	U_a=444,1 kV
$C_i' = 57{,}01$ pF / m	$C_a' = 89{,}48$ pF / m
$C_g' = 34{,}82$ pF / m	

Übernimmt man den Schaltstoßspannungspegel von 1800 kV aus der ungesteuerten Anordnung, so folgt:

U_{is}=1099,44 kV	U_{as}=700,56 kV
E_{maxsi}=22,09 kV/mm	E_{maxsa}=7,88 kV/mm

Übernimmt man den Blitzstoßspannungspegel von 2175 kV aus der ungesteuerten Anordnung, so folgt:

U_{is}=1328,49 kV	U_{as}=846,51 kV
E_{maxsi}=26,7 kV/mm	E_{maxsa}=9,52 kV/mm

Während die zulässigen Werte im Außenbereich nicht erreicht werden, werden sie im Innenbereich deutlich überschritten.

Der Innenleiterquerschnitt dieser Anordnung beträgt 3634 mm^2.

Bezogen auf die ursprüngliche Anordnung besitzt die optimierte potentialgesteuerte Anordnung 72 % des Außenleiterquerschnitts. Fertigt man die Steuerelektrode aus Kunststoff, so beträgt das Gesamtgewicht der Anordnung ohne Stützer, Gasfüllung und Montagematerial 68 % der ungesteuerten. Das mit Isoliergas zu füllende Volumen sinkt auf 55,5 %. Wie auch bei dem 500 kV System muß im Innenbereich mit Stoßspannungsableitern auf eine Reduzierung der Stoßspannungsspitzen hingearbeitet werden.

9.3 345 kV Wellmantelkabel

Der Literatur [7] werden folgende Daten über ein Wellmantelkabel entnommen: Nennspannung U_n=345 kV , maximale Betriebsspannung 362 kV. Daraus folgt eine maximale Leiterspannung U_0=209 kV. Die maximale Feldstärke am Innenleiter beträgt dabei 3,3 kV/mm.

Der Außendurchmesser des Innenleiters beträgt 120 mm. Der Innendurchmesser des Außenleiters, der als Wellmantel ausgebildet ist, beträgt 340 mm, der Außendurchmesser 390 mm. Obwohl die Dicke des Wellmantelbleches nur 4 mm beträgt, besitzt der Wellmantel durch die Wellung eine Dicke von 25 mm. Für die Berechnung der elektrischen Feldstärke ist hierbei der Innendurchmesser maßgeblich.

Will man in ein solches System einen Wellmantel einfügen, so muß er sich hinsichtlich Flexibilität und Biegeeigenschaften an die Wellmantelrohre des Innen und Außenleiters anpassen. Insbesondere darf er sich beim Biegen nichtflachdrücken. Daher liegt es nahe, als Steuerelektrode ebenfalls einen Wellmantel vorzusehen. Ob dieser aus Aluminium oder Kunststoff hergestellt wird, soll an dieser Stelle offen bleiben.

Wählt man aber einen Wellmantel, so ist selbst bei geringen Materialstärken durch die Wellung eine relativ große Dicke gegeben, was sich störend bemerkbar macht. Daher werden hier alternativ zwei Steuerelektroden eingefügt. Die eine Version ist wie der Außenwellmantel 25 mm dick. Die andere Version besitzt eine geringere Wellung und ist nur 12 mm dick. Für beide Versionen werden nun nach dem Verfahren aus Kapitel 3.1.2 optimale potentialgesteuerte Anordnungen berechnet.

Für einen 25 mm dicken Steuerelektrodenwellmantel ergeben sich die Abmessungen:

Leiteraußendurchmesser d_L=47 mm
Steuerelektrodeninnendurchmesser d_{si}=107 mm
Steuerelektrodenaußendurchmesser d_{sa}=275,25 mm
Außenleiterinnendurchmesser d_a=275,25 mm

Die Dicke s_{si} der Steuerelektrode war mit 25 mm angesetzt worden, die Dicke des Außenwellmantels wird mit s_a=25 mm vom Vorbild übernommen. Daraus ergeben sich ein Steuerelektrodenaußendurchmesser d_{sa} von 157 mm und ein Außendurchmesser d_{aa} von 325,25 mm. Dies entspricht einer Durchmesserverminderung auf 83,4 % gegenüber der ungesteuerten Anordnung.

Für einen 12 mm dicken Steuerelektrodenwellmantel ergeben sich die Abmessungen:

Leiteraußendurchmesser d_L=47 mm
Steuerelektrodeninnendurchmesser d_{si}=118,5
Außenleiterinnendurchmesser d_a=255,5 mm

Die Dicke s_{si} der Steuerelektrode war mit 12 mm angesetzt worden, die Dicke des Außenwellmantels wird mit s_a=25 mm von der Anordnung ohne Steuerelektrode übernommen. Daraus ergeben sich ein Steuerelektrodenaußendurchmesser d_{sa} von 142,5 mm und ein Außenleiteraußendurchmesser d_{aa} von 305,5 mm. Dies entspricht einer Durchmesserverminderung auf 78,3 % gegenüber der ungesteuerten Anordnung.

Die relativ große Dicke der Wellmäntel durch die Wellung wirkt sich sehr störend aus. Es ist hier Aufmerksamkeit darauf zu richten, flexible Steuerelektrodenkonstruktionen zu finden, die nur eine geringe Dicke besitzen. Eventuell muß die Konstruktion und Verteilung der Stützer in diese Überlegung mit einbezogen werden.

10. Zusammenfassung

Durch die Einführung einer Steuerelektrode ist es nun möglich, die Abmessungen SF_6 isolierter Kabel und Rohrleiter zu verringern. Je nach Konzept der Ausgangsanordnung können die Außendurchmesser potentialgesteuerten Kabel und Rohrleiter auf bis zu ca. 70 % ungesteuerter Anordnungen verringert werden.

Die Reduzierung ist nur dann voll nutzbar, wenn die ungesteuerten Anordnungen zur Optimierung ihrer Abmessungen mit übermäßig großen Innenleiterdurchmessern gemäß Gleichung (3.1) ausgeführt wurden, und die potentialgesteuerten Ausführungen mit einem Innenleiterdurchmesser versehen werden können, der in etwa dem für potentialgesteuerte Anordnungen idealen Leiterdurchmesser nach Gleichung(12.1) entspricht.

Bei flexiblen Wellmantelkabeln muß damit gerechnet werden, daß die Steuerelektrode aufgrund ihrer Wellung sehr dick ausfällt, und dadurch die Durchmesserreduzierung sich teilweise aufhebt. Bei Rohrleitern, deren Innenleiter gemäß Gleichung (3.1) ideal für ungesteuerte Anordnungen konzipiert wurde, und der auch nach Einführung einer Steuerelektrode nicht verringert werden kann, ist eine Außendurchmesserreduzierung auf 85 % der ungesteuerten Anordnung erreichbar.

Eine Gewichtsreduzierung ist ebenfalls möglich, doch ist diese nur dann gegeben, wenn die Materialeinsparungen durch die Verringerung des Außenleiterdurchmessers und des Innenleiterdurchmessers das Zusatzgewicht der Steuerelektrode ausgleichen. Daher, und auch zur Unterdrückung von Längs- und Wirbelströmen ist es sinnvoll, eine Steuerelektrode aus einem leitfähigem Kunststoff zu verwenden. Dann ist unter günstigen Umständen eine Gewichtsreduzierung auf ca. 65 % zu erreichen. Selbst im Vergleich zu einer dreiphasigen ungesteuerten Anordnung ist eine Gewichtsreduzierung möglich (Kapitel 9.1.4).

Eine Bestimmung der idealen geometrischen Abmessungen einer potentialgesteuerten Anordnung mit ideal dünner Steuerelektrode ist bei Kenntnis der Spannung zwischen Innen- und Außenleiter, sowie der maximalen

Feldstärke am Innenleiter und am Außenrand der Steuerelektrode mit den Gleichungen (12.1;12.2;12.3) möglich.

Zur näherungsweisen Bestimmung der Abmessungen der Steuerelektrode und des Außenleiters auch bei vom Optimum stark abweichenden Innenleiterabmessungen kann die Abbildung 9 verwendet werden, die auch zeigt, daß sich das Problem mit dem Quotienten E_{max}/U_0 normieren läßt. Daraus folgt auch, das sich hiermit das Problem für beliebige Spannungen und Isolierstoffe lösen läßt, vorausgesetzt der Feldstärkeverlauf in der ungesteuerten Anordnung wird durch Gleichung (1) hinreichend genau beschrieben. Statt Abbildung 9 kann auch das Ausgleichspolynom aus Kapitel 7.2 innerhalb seines Geltungsbereiches verwendet werden. Zur genaueren Bestimmung stehen zwei im Anhang beschriebene Computerprogramme zur Verfügung.

11. Ausblick

Im Rahmen dieser Untersuchung werden in erster Linie Fragen der Elektrostatik behandelt. Die Frage der Unterdrückung der Steuerelektrodenlängsströme durch eine widerstandsbehaftete Kunststoffsteuerelektrode wirft aber auch werkstofftechnische Fragen auf.

Zudem beeinflußt man damit auch die Betriebseigenschaften der Leitung, weil das Zulassen von Strömen in der Steuerelektrode einen erheblichen Energiefluß zur Folge hätte, der sicherlich in betriebstechnischer Hinsicht berücksichtigt werden müßte.

Da die Kühlung SF_6 isolierter Leitungen in erster Linie durch Konvektion im Gas erfolgt, muß untersucht werden, wie der Einbau einer Steuerelektrode die Konvektion behindert. Bei einer Steuerelektrode aus Kunststoff ist zudem die Wärmeleitung von innen nach außen schlechter als bei einer Aluminiumkonstruktion.

Es ist daher zu Überlegen, ob die Steuerelektrode nicht als Gitter ausgeführt werden kann, was auch den Materialbedarf weiter verringern kann. Es sei an dieser Stelle auf die Gitterkonstruktionen von Vakuumröhren hingewiesen. Nicht zuletzt würden in einer Steuerelektrode selber Verluste entstehen.

Als größtes noch zu lösendes Problem stellt sich die Stoßspannungsfestigkeit der Anordnung dar. Bei Beaufschlagung mit einer Stoßspannung teilt sich diese im umgekehrten Verhältnis der Teilkapazitätsbeläge im Innen- und Außenbereich auf, was dazu führt, daß die zulässige Feldstärke im Innenbereich überschritten wird, aber im Außenbereich nicht erreicht wird. Es ist zu überlegen, hier Stoßspannungsableiter einzusetzen.

Auf eine Steuerelektrode wirken auch mechanische Kräfte. Die Auswirkungen von Magnetfeldern auf die Steuerelektrode sind unter anderem von den in der Steuerelektrode selber fließenden Strömen abhängig. Eine Reduzierung der Ströme in der Steuerelektrode vermindert auch die mechanische Kraftwirkung.

Bei flexiblen Kabeln ist zudem mit einer Beanspruchung durch Biegung zu rechnen. Hierbei muß die Steuerelektrode der Biegung folgen, ohne ihren Querschnitt zu deformieren oder in eine exzentrische Position zu geraten. Die aus diesem Grunde verwendeten Wellmäntel sind aber relativ dick

Es existiert also eine Reihe von Fragen, die in weiteren Untersuchungen geklärt werden könnten.

Anhang

Anhang A

Beschreibung des Programmes MSSTAU

Das Programm MSSTAU berechnet aus den Parametern Leiterdurchmesser, minimaler und maximaler Steuerelektrodeninnendurchmesser, Steuerelektrodendicke, minimaler und maximaler Außenleiterinnendurchmesser sowie der Spannung zwischen Innen- und Außenleiter und der zulässigen Maximalfeldstärke die Anordnung mit dem geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmesser. Zusätzlich kann auch noch die Schrittweite, mit der das Programm arbeitet, variiert werden.

Nach einer Sequenz, in der die im Programm verwendeten Variablen deklariert werden, folgt eine Sequenz, in der die oben angegebenen Parameter abgefragt werden.

Dann werden diverse Hilfsvariablen auf ihre Anfangsstellung gesetzt. Der aktuelle Steuerelektrodeninnendurchmesser wird auf den minimalen Steuerelektrodeninnendurchmesser gesetzt, und der aktuelle Außenleiterinnendurchmesser auf den maximalen Außenleiterinnendurchmesser. Den gleichen Wert bekommen auch Variablen zugewiesen die den alten Wert des Steuerelektrodeninnendurchmessers und den alten Wert des Außenleiterinnendurchmessers enthalten. Hier im weiteren Verlauf der Beschreibung werden diese beiden Variablen "Altwerte" genannt.

Sodann wird eine Datei geöffnet, in der diese Altwerte als ASCII-Daten abgelegt werden können.

Es beginnen nun zwei ineinander verschachtelte Schleifen. Die äußere wird Schleife 2 genannt, die innere Schleife 1.

Schleife 2 vergrößert mit der eingegebenen Schrittweite den Steuerelektrodeninnendurchmesser, Schleife 1 verringert mit gleicher Schrittweite den Außenleiterinnendurchmesser.

Beide Schleifen sind "abweisend", das heißt die Schleifenbedingung wird am Beginn der Schleife überprüft. Die Schleifenbedingung von Schleife 2 ist, ob der aktuelle Steuerelektrodeninnendurchmesser kleiner als der maximale Wert ist, und für Schleife 1, ob der aktuelle Wert des Außenleiterinnendurchmessers größer als der minimale Wert ist.

In Schleife 1 wird der noch fehlende aktuelle Wert für den Steuer-elektrodenausendurchmesser aus dem aktuellen Wert für den Steuer-elektrodeninnendurchmesser und der Dicke der Steuerelektrode berechnet.

Aus diesen aktuellen Werten wird mit den Gleichungen (11.1; 11.2) die Spannungen zwischen Innenleiter und Steuerelektrode, sowie zwischen Außenleiter und Steuerelektrode bestimmt, und mit diesen dann weiter unter Verwendung der Gleichungen (4.1;4.2) die Feldstärke am Innenleiter und am Außenrand der Steuerelektrode. Ist die Feldstärke an beiden Stellen kleiner oder gleich der maximal zulässigen, so werden die aktuellen Werte des Steuerelektrodeninnendurchmessers und des Außenleiterinnendurchmessers als Altwerte übernommen.

Weiter wird der Außenleiterinnendurchmesser um eine Schrittweite verringert, und zur Überprüfung der Schleifenbedingung am Anfang von Schleife 1 zurückgekehrt.

Ist die Feldstärke an einer von beiden Stellen größer als die zulässige, so wird Schleife 1 verlassen.

Nach dem Verlassen von Schleife 1 werden in Schleife 2 die Altwerte in die geöffnete Datei geschrieben. Dann wird der Steuerelektrodeninnendurchmesser um eine Schrittweite vergrößert, und zur Überprüfung der Schleifenbedingung am Anfang von Schleife 2 zurückgekehrt.

Ist irgendwo eine Schleifenbedingung nicht mehr erfüllt, so werden beide Schleifen verlassen und die Datei mit den abgespeicherten Werten geschlossen. Es wird eine weitere Datei angelegt. In sie werden die Anfangs abgefragten Parameter notiert.

Damit ist das Programm beendet.

Die Datei mit den ASCII-Daten kann in anderen Programmen weiterverarbeitet werden. Zum Beispiel in einem Plotprogramm zur Darstellung der Abhängigkeit des geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmessers vom Steuerelektrodeninnendurchmesser. Im einfachsten Fall kann sie mit einem Editor geöffnet werden. Man ließt den kleinsten Wert für den Außenleiterinnendurchmesser ab und dazu den Wert für den Steuerelektrodeninnendurchmesser.

Ist die Schrittweite hinreichend klein gewählt worden, ergibt sich wegen des flachen Verlaufs der Kurve im Minimum eine Anzahl identischer Werte für den kleinsten Außenleiterinnendurchmesser, zu dehnen unterschiedliche, aber nebeneinanderliegende Werte des Steuerelektrodeninnendurchmessers gehören. In diesem Fall ist es angebracht, den arithmetischen Mittelwert aus den gefundenen Werten für den Steuerelektrodeninnendurchmesser zu bilden. Erfahrungsgemäß erzeugt man keinen unzulässig großen Fehler, wenn man zur Vereinfachung das arithmetische Mittel lediglich aus dem größten und dem kleinsten Wert wählt.

Anhang B

Beschreibung des Programmes MLESTA

Das Programm MLESTA berechnet aus den Parametern minimaler und maximaler Leiterdurchmesser, minimaler und maximaler Steuerelektroden-innendurchmesser, Steuerelektrodendicke, minimaler und maximaler Außenleiterinnendurchmesser sowie der Spannung zwischen Innen- und Außenleiter und der zulässigen Maximalfeldstärke die Anordnung mit dem geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmesser. Zusätzlich kann auch noch die Schrittweite, mit der das Programm arbeitet, getrennt nach Leiterdurchmesser, Steuerelektrodendurchmesser und Außenleiterdurchmesser bestimmt werden.

Grundsätzlich ist das Programm dem einfacher gehaltenen Programm MSSTAU sehr ähnlich.

Nach der Variablendeklaration und der Eingabesequenz werden die aktuellen Werte für auf ihren Anfangswert gesetzt. Dies sind der minimale Leiterdurchmesser, der minimale Steuerelektrodeninnendurchmesser, und der maximale Außenleiterinnendurchmesser.

Die Schleifenstruktur entspricht der des Programmes MSSTAU, nur das hier eine zusätzliche äußere Schleife 3 existiert. In ihr wird der Innenleiterdurchmesser schrittweise vergrößert.

In Schleife 1 wird, wie gehabt, mit den aktuellen Werten geprüft, ob die Maximalfeldstärken eingehalten werden. Werden sie eingehalten, so wird zusätzlich geprüft, ob der aktuelle Wert für den Außenleiterinnendurchmesser kleiner als der letzte Altwert dafür ist. Ist dies der Fall, so wird mit der Schleife fortgefahren, ansonsten wird sie verlassen. Dies hat seinen Grund darin, daß hier nur der kleinstmögliche Wert des Außendurchmessers mit dem dazu optimalen Steuerelektrodendurchmesser für den aktuellen Leiterdurchmesser interessiert.

Aus diesem Grunde werden die Altwerte auch nicht in Schleife 2, sondern in Schleife 3 in einer Datei abgespeichert. So besteht jeder Datensatz aus dem Innenleiterdurchmesser, dem geringstmöglichen Außenleiterinnendurchmesser und dem dazu optimalen Steuerelektrodendurchmesser.

Bei Benutzung des Programmes ist darauf zu achten, daß die Schrittweite, mit der die Steuerelektrode variiert wird, deutlich kleiner ist als die, mit der der Innenleiter variiert wird. Optimal ist ein fünftel bis ein zehntel der Schrittweite. Die Schrittweite, mit der der Außenleiterdurchmesser variiert wird, ist wiederum deutlich feiner als die der Steuerelektrode zu wählen. Optimal ist hier ein zehntel der Steuerelektrodenschrittweite. Da die Rechenzeit sonst unangenehm lang wird, kann der Innenleiterdurchmesser nur relativ grob variiert werden. Siehe hierzu auch Kapitel 6.

Literaturverzeichnis

[1] Kiwit W., Wanser G., Laarmann H.
Hochspannungs- und Hochleistungskabel
VWEW, Frankfurt (Main), 1985

[2] Dorsch H.
Überspannungen und Isolationsbemessung bei Drehstrom-Hochspannungsanlagen
Siemens-AG, Berlin/München, 1981

[3] Wolff I.
Grundlagen und Anwendungen der Maxwellschen Theorie, Band 1
BI-Wiss.-Verl., Mannheim/Wien/Zürich, 1991

[4] Leaver R.H., Thomas T.R.
Versuchsauswertung
Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1977

[5] Gellert W.(Hrsg.)
Mathematik Ratgeber
Verlag Harri Deutsch, Thun, 1988

[6] Kreyszig E.
Statistische Methoden und ihre Anwendungen
Vandenhoeck & Rupert, Göttingen, 1979

[7] Miller D.B., Spencer E.M., Kroon P.J. Netzel P.C.
Flexible gas-insulatet cable for 230 kV, 345 kV and 500 kV
IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol.PAS-103, No.9, September 1984

[8] Research and developement in the united states on three-conductor and UHV compressed gas insulated transmission lines for heavy load transmission
CIGRE-Bericht 21-09, 1978

[9] The technical developement and practical use of bulk power underground transmission cable systems in Japan
CIGRE-Bericht 21-03, 1978

[10] Blechschmidt H. H., Wanser G.
Erfahrungen mit neueren Kabelisolierstoffen
VWEW , Frankfurt (Main), 1980

[11] VDE 0111
Isolationskoordination für Betriebsmittel in Drehstromnetzen über 1 kV Isolation Leiter gegen Erde, 1979

[12] IEC 71-1 (1976)
Insulation co-ordination, Part 1: Terms, definitions, principles and rules.

[13] Häberle, Senner (Hrsg.)
Tabellenbuch Elektrotechnik
Verlag Europa-Lehrmittel, Wuppertal, 1981

[14] Brakelmann H.
Belastbarkeiten der Energiekabel
VDE-Verlag, Berlin/Offenbach, 1984

Liste der verwendeten Formelzeichen

A_a	Querschnittsfläche Außenleiter
A_L	Qerschnittsfläche Innenleiter
A_{si}	Querschnittsfläche Steuerelektrode
C	Kapazität
C'	Kapazitätsbelag
C'_a	Kapazitätsbelag im Außenbereich
C'_g	Gesamtkapazitätsbelag
C'_i	Kapazitätsbelag im Innenbereich
d	Durchmesser (allgemein)
d_a	Innendurchmesser Außenleiter
d_{aa}	Außendurchmesser Außenleiter
d_L	Außendurchmesser Innenleiter
d_{sa}	Außendurchmesser Steuerelektrode
d_{si}	Innendurchmesser Steuerelektrode
E	Feldstärke (allgemein)
E_{max}	maximale Feldstärke
E_{maxsi}	maximale Feldstärke im Innenbereich bei Stoßspannungsbelastung
E_{maxsa}	maximale Feldstärke im Außenbereich bei Stoßspannungsbelastung
s_a	Leiterwandstärke Außenleiter
s_L	Leiterwandstärke Innenleiter
s_{si}	Leiterwandstärke Steuerelektrode
U_0	Leiterspannung (zwischen Innen- und Außenleiter)
U_a	Spannung zwischen Außenleiter und Steuerelektrode
U_{as}	Spannung zwischen Außenleiter und Steuerelektrode bei Stoßspannungsbelastung
U_i	Spannung zwischen Innenleiter und Steuerelektrode
U_{is}	Spannung zwischen Innenleiter und Steuerelektrode bei Stoßspannungsbelastung
U_n	Nennspannung
a,b,c,d,e,f,g,h	Koeffizienten für Ausgleichspolynom
F_{ad}	Relativer Fehler des Außenleiterdurchmessers
$\overline{F_{ad}}$	arithmetisches Mittel von F_{ad}

F_{Ea}	Relativer Fehler der Feldstärke im Außenbereich
$\overline{F_{Ea}}$	arithmetisches Mittel von F_{Ea}
F_{Ei}	Relativer Fehler der Feldstärke im Innenbereich
$\overline{F_{Ei}}$	arithmetisches Mittel von F_{ei}
K_1	Häufig verwendeter Zwischenwert
K_2 bis K_6	Konstanten
ε_r	Relative Dielektrizitätskonstante
σ_{ad}	Standardabweichung von $\overline{F_{ad}}$
σ_{Ea}	Standardabweichung von $\overline{F_{Ea}}$
σ_{Ei}	Standardabweichung von $\overline{F_{Ei}}$
ε_0	Allgemeine Dielektrizitätskonstante
ρ_{AL}	Dichte von Aluminium
ρ_{EP}	Dichte von Epoxid

Spezielle Indizes:

11	Werte für eine auf geringstmöglichen Außenleiterdurchmesser optimierte potentialgesteuerte Anordnung
22	Werte für eine auf geringstmöglichen Außenleiterdurchmesser optimierte ungesteuerte Anordnung
12	Werte einer Anordnung, die den Innenleiter durchmesser d_{L11} einer optimalen potentialgesteuerten Anordnung übernimmt, aber ansonsten ungesteuert gerechnet wird.
21	Werte einer Anordnung, die den Innenleiter durchmesser d_{L22} einer optimalen ungesteuerten Anordnung übernimmt, aber ansonsten potentialgesteuert gerechnet wird.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Heinrich Brakelmann für die interessante Aufgabenstellung und sein Interesse am Fortschritt dieser Arbeit

Weiterhin danke ich Herrn Dipl.-Ing. Jörg Stammen für seine Anregungen zur schriftlichen Gestaltung.

Ferner allen meinen Freunden, die mich zu dieser Arbeit ermutigt und moralisch unterstützt haben.

Duisburg, April 1995

Bernd Wiebus